

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Jurga ŠEPUTYTĖ-JUCIKĖ

PRIEDŲ IR LENGVŲJŲ UŽPILDŲ POVEIKIS
TERMOIZOLIACINIO CEMENTINIO
KOMPOZITO STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2016

Disertacija rengta 2012–2016 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

dr. Marijonas SINICA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
medžiagų inžinerija – 08T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties
disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Antanas LAUKAITIS (Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

prof. dr. Aleksandrs KORJAKINS (Rygos technikos universitetas, statybos
inžinerija – 02T),

doc. dr. Džigita NAGROCKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

doc. dr. Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

doc. dr. Zenonas VALANČIUS (Kauno technologijos universitetas,
chemijos inžinerija – 05T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties
disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2016 m. birželio 6 d. 14 val.** Vilniaus
Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2016 m. gegužės 5 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus
Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223
Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2366-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-928-8

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2016

© Jurga Šeputytė-Jucikė, 2016

jurga.seputyte@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Jurga ŠEPUTYTĖ-JUCIKĖ

IMPACT OF ADDITIVES AND
LIGHTWEIGHT AGGREGATES ON THE
STRUCTURE AND PROPERTIES OF
THERMAL INSULATING CEMENTITIOUS
COMPOSITE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2016

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2016.

Supervisor

Dr Marijonas SINICA (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil Antanas LAUKAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Prof. Dr Aleksandrs KORJAKINS (Riga Technical University, Civil Engineering – 02T),
Assoc. Prof. Dr Džigita NAGROCKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),
Assoc. Prof. Dr Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),
Assoc. Prof. Dr Zenonas VALANČIUS (Kaunas University of Technology, Chemical Engineering – 05T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 6 June 2016.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 5 May 2016.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas priedų (pucolaninio, superplastiklio ir orą įtraukiančio) poveikis cementinei matricai, bei termoizoliacinis cementinis kompozitas su lengvaisiais užpildais – putstiklio granulėmis ir trupinta polistireninio putplasčio atlieka. Pagrindinis disertacijos tikslas yra ištirti kompleksinį panaudotų priedų poveikį cementinei matricai, parinkti technologinius šios matricos formavimo parametrus ir sukurti termoizoliacinį kompozitą iš modifikuotos cementinės matricos ir lengvųjų užpildų.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai. Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikta bendra informacija apie portlandcemenčio hidratacijos procesą, pucolaninius priedus ir jų panaudojimą, apie plastifikuojančias ir orą įtraukiančias įmaišas ir jų veikimo principus. Taip pat šiame skyriuje pateikta informacija apie lengvuosius kompozito užpildus, lengvuosius kompozitus, atlikta cementinių kompozitų su lengvaisiais užpildais literatūros analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašytos tyrimams naudojamos medžiagos, pateiktos jų pagrindinės charakteristikos. Taip pat pateiktos cementinės matricos ir termoizoliacinio kompozito sudėtys, aprašyti tyrimų metodai bei naudojama įranga.

Trečiajame skyriuje aprašytas pucolaninio priedo, plastifikuojančios ir orą įtraukiančios įmaišos poveikis cemento tešlos ir cemento akmens struktūrai ir savybėms. Taip pat pateikiami lengvųjų užpildų fizikinių bei mechaninių savybių ir struktūros tyrimai. Pateikiami kompozitų, vienu atveju su putstiklio granulių užpildu ir modifikuota cementine matrica, kitu atveju su putstiklio granulių ir trupintos polistireninio putplasčio atliekos užpildais ir modifikuota cementine matrica, eksploatacinių savybių ir struktūros tyrimai.

Disertacijos tema paskelbti keturi straipsniai: vienas – mokslo žurnale įtrauktame į *Thomson Reuters Web of Science* leidinių sąrašą, turinčiame citavimo indeksą, du – tarptautinės duomenų bazės mokslo žurnaluose, vienas – recenzuojamoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos medžiagoje. Disertacijos tema skaityti keturi pranešimai Lietuvos ir kitų šalių konferencijose. Gautas vienas patentas.

Abstract

The impact of additives (pozzolanic, superplasticizing and air-entraining) on cementitious matrix as well as thermal insulating composite with lightweight aggregates – cellular glass beads and crushed expanded polystyrene waste are analysed. The main object of the research is to investigate the complex impact of all three additives on cementitious matrix, select technological parameters for cementitious matrix formation and develop thermal insulating composite from modified cementitious matrix and lightweight aggregates.

The thesis consists of introduction, three chapters, general conclusions, references and the list of author's publications related to thesis topic.

The first chapter is designed for literature review. It presents the general information about the hydration process of Portland cement, pozzolanic additives and their application, plasticizing, air-entraining admixtures and their operating principles. This chapter as well gives the information about lightweight aggregates for composites, lightweight composites and presents the literature analysis about cementitious composites with lightweight aggregates. Conclusions and objectives of the thesis are formulated at the end of this chapter.

The second chapter consists of materials used for the research and their characteristics. Compositions of cementitious matrix and thermal insulating composites are presented; methods and equipment used for the research are described.

The third chapter presents the impact of pozzolanic, plasticizing and air-entraining additives on structure and properties of cementitious matrix and cementitious stone as well as physical-mechanical properties and structure of lightweight aggregates. The performance and structure research of composites in one case with cellular glass beads as an aggregate and modified cementitious matrix and in another case with cellular glass beads and crushed expanded polystyrene waste as aggregates and modified cementitious matrix are presented.

4 scientific articles are published on the topic of the dissertation: one in scientific journal included in the *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)* with a citation index, two – in scientific journals of international databases; one – in the Lithuanian conference proceedings. Results of this thesis were presented in 4 conferences in Lithuania and other countries. One patent is received.

Žymėjimai

Simboliai

A – plotas, mm^2 ;

b – plotis, mm ;

$c_{w,s}$ – kapiliarinės įgerties koeficientas, $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$;

D – sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis, %;

F – apkrova, N ;

f_{cg} – cementinės matricos gniuždymo stipris, MPa ;

f_{cl} – cementinės matricos lenkimo stipris, MPa ;

F_{RE} – eksploatacinis atsparumas šalčiui, sąlyginiai ciklai;

G – kapiliarinis masės srauto greitis vakuume, g/cm^2 ;

g_2 – kapiliarinis masės srauto greitis, $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$;

h – aukštis, mm ;

l – ilgis, mm ;

m – masė, g ;

N – struktūros nevienalytiškumo laipsnis, sąlyginiai vienetai;

R – poringos erdvės rezervas, %;

R^2 – determinacijos koeficientas;

S_R – standartinis nuokrypis;

T – garso signalo sklidimo laikas, m/s ;

t – trukmė, min;
 V – tūris, mm^3 ;
 W – ilgalaikis vandens įmirkis, %;
 W_E – efektyvus poringumas, %;
 W_R – bendras atvirojo poringumo rodiklis, %;
 λ – šilumos laidumo koeficientas, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
 ρ – tankis, kg/m^3 ;
 σ_m – termoizoliacinio kompozito gniuždymo stipris, MPa;
 σ_b – termoizoliacinio kompozito lenkimo stipris, MPa;
 Δf – gniuždymo stiprio pokytis, %.

Santrumpos

C_2S ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) – dikalcio silikatas (belitas);
 C_3S ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) – trikalcio silikatas (alitas);
 C_3A ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) – trikalcio aliuminatas;
 C_4AF ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) – tetrakalcio aliumoferitas;
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – kalcio hidroksidas (portlanditas);
 CSH – kalcio hidro silikatai;
 EPS – polistireninis putplastis;
 MKA – metakaolininė atlieka;
 PC – portlandcementis;
 PSG – putstiklio granulės;
 PAM – paviršiaus aktyviosios medžiagos;
 SPL – superplastiklis;
 OII – orą įtraukianti įmaiša;
 UIG – ultragarso impulso sklidimo greitis, m/s ;
 V/C – vandens ir cemento santykis;
 V/M – vandens ir kietų medžiagų santykis;
 V/R – vandens ir rišamosios medžiagos, sudarytos iš portlandcemenčio ir metakaolininės atliekos, santykis.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. MOKSLINIŲ TYRIMŲ APIE LENGVŲJŲ KOMPOZITŲ GAMYBOS ŽALIAVAS, SAVYBES IR NAUDOJIMĄ ANALIZĖ	7
1.1. Portlandcementis ir jo hidratacijos procesas.....	7
1.2. Cementinę matricą modifikuojantys pucolaniniai priedai	11
1.2.1. Pucolaniniai priedai ir jų poveikis cemento savybėms	11
1.2.2. Metakaolinas ir jo poveikis cemento savybėms.....	13
1.3. Orą įtraukiančios įmaišos	15
1.4. Superplastikliai	16
1.5. Lengvieji užpildai.....	18

1.5.1. Lengvieji užpildai iš mineralinės kilmės žaliavų	18
1.5.2. Putstiklio ir polistireninio putplasčio granulės.....	20
1.6. Lengvieji kompozitai	21
1.6.1. Aktyviųjų cementinių kompozitų eksploatacinės savybės	21
1.6.2. Cementinių kompozitų su lengvaisiais užpildais eksploatacinės savybės	22
1.6.3. Cementinių kompozitų su putstiklio ir polistireninio putplasčio užpildu eksploatacinės savybės	27
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	29
2. TERMOIZOLIACINIAM CEMENTINIAM KOMPOZITUI NAUDOTŲ MEDŽIAGŲ APRAŠYMAS IR TYRIMŲ METODIKOS	31
2.1. Naudotos medžiagos.....	31
2.1.1. Portlandcementis.....	32
2.1.2. Metakaolininė atlieka.....	33
2.1.3. Plastifikuojančios ir orą įtraukiančios įmaišos.....	35
2.1.4. Lengvieji užpildai	35
2.2. Cementinės matricos ir termoizoliacinio kompozito formavimo mišinių paruošimas bei bandinių formavimas	36
2.2.1. Cementinės matricos bandinių formavimas	36
2.2.2. Termoizoliacinio kompozito bandinių formavimas	37
2.3. Tyrimų metodikos	39
2.3.1. Cemento tešlos ir cemento akmens tyrimo metodai	39
2.3.2. Termoizoliacinio kompozito bandinių tyrimo metodai.....	41
2.4. Antrojo skyriaus išvados	48
3. CEMENTINĖS MATRICOS IR TERMOIZOLIACINIO KOMPOZITO TYRIMAI	49
3.1. Modifikuojančių priedų poveikis cemento tešlos savybėms	50
3.1.1. Vandens kiekio poreikis modifikuotai cemento tešlai	50
3.1.2. Cemento tešlos hidratacijos kinetika	51
3.1.3. Cemento tešlos tankis	52
3.2. Modifikuojančių priedų poveikis cemento akmens savybėms	55
3.2.1. Cemento akmens tankis	55
3.2.2. Modifikuojančių priedų poveikis cemento akmens gniuždymo ir lenkimo stipriams	57
3.2.3. Modifikuojančių priedų poveikis cemento akmens ultragarso impulso sklidimo greičiui	61
3.2.4. Cemento akmens makrostruktūra	62
3.2.5. Cemento akmens rentgenografiniai tyrimai	65
3.2.6. Cemento akmens mikrostruktūra	66
3.2.7. Cementinės matricos ir modifikuojančių priedų sąveika	67
3.3. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais tyrimai	69
3.3.1. Lengvųjų užpildų tyrimai.....	69
3.3.2. Lengvųjų užpildų poveikis hidratacijos kinetikai	70
3.3.3. Termoizoliacinio kompozito makro- ir mikrostruktūra	71
3.3.4. Termoizoliacinio kompozito tankis	73

3.3.5. Ultragarso impulso sklaidimo greitis termoizoliaciniame kompozite	74
3.3.6. Gniuždymo stipris.....	75
3.3.7. Lenkimo stipris	76
3.3.8. Šilumos laidumas	77
3.3.9. Kapiliarinė vandens įgertis	79
3.3.10. Ilgalaikis vandens įmirkis	82
3.3.11. Drėgminės deformacijos	83
3.3.12. Pralaidumas vandens garams	84
3.3.13. Eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal struktūros rodiklius	86
3.3.14. Tiesioginiai atsparumo šalčiui tyrimai	88
3.3.15. Degumas	90
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	92
BENDROSIOS IŠVADOS	97
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	99
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113
PRIEDAI ¹	129
A priedas. Gaisringumo nustatymo pagal LST EN 13823 bandymų grafikai	130
B priedas. Modifikuotos cementinės matricos patentas	131
C priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	138
D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos...	143

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRUDUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
Object of the thesis	2
The aim of the thesis	2
The objectives of the thesis	2
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis and its value	3
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	4
Structure of the disseration.....	5
 1. REVIEW OF LITERATURE ON THE SUBJECT OF RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF LIGHTWEIGHT COMPOSITES THEIR PROPERTIES AND APPLICATION.....	 7
1.1. Portland cement and its hydration process	7
1.2. Pozzolanic additives	11
1.2.1. Pozzolanic additives and their effect on the properties of cement	11
1.2.2. Metakaoline and its effect on the properties of cement	13
1.3. Air-entraining admixture	15
1.4. Superplasticizers.....	16

1.5. Lightweight aggregates	18
1.5.1 Lightweight aggregates of mineral raw materials	18
1.5.2 Beads of cellular glass and expanded polystyrene	20
1.6. Lightweight composites	21
1.6.1. Porous performance of cementitious composites	21
1.6.2. Performance of cementitious composites with lightweight aggregates	22
1.6.3. Performance of cementitious composites with cellular glass and expanded polystyrene aggregates	27
1.7. Conclusions of the first chapter and formulation of the objectives of the dissertation	29
 2. REVIEW OF RAW MATERIALS AND RESEARCH METHODS FOR THERMAL INSULATING CEMENTITIOUS COMPOSITE	31
2.1. Materials	31
2.1.1. Portland cement	32
2.1.2. Metakaolinic waste	33
2.1.3. Superplasticizer and air-entraining additives	35
2.1.4. Lightweight aggregates	35
2.2. Preparation of forming mixtures and specimens moulding for cementitious matrix and thermal insulation composite	36
2.2.1. Moulding of cementitious matrix specimens	36
2.2.2. Moulding of thermal insulating composite specimens	37
2.3. Research methodology	39
2.3.1. Research methods for cement paste and cement stone	39
2.3.2. Research methods for thermal insulating composite	41
2.4. Conclusions of the second chapter	48
 3. RESEARCH OF CEMENTITIOUS MATRIX AND THERMAL INSULATING COMPOSITE	49
3.1. Influence of modifying additives on cement paste properties	50
3.1.1. Determination of water content for modified cement paste	50
3.1.2. Kinetics of cement paste hydration	51
3.1.3. Density of cement paste	52
3.2. Influence of modifying additives on cement stone properties	55
3.2.1. Density of cement stone	55
3.2.2. Influence of modifying additives on compressive and bending strengths of cement stone	57
3.2.3. Influence of modifying additives on ultrasonic pulse velocity of cement stone	61
3.2.4. Macrostructure of cement stone	62
3.2.5. X-Ray diffraction of cement stone	65
3.2.6. Microstructure of cement stone	66
3.2.7. Interaction between cementitious matrix and modifying additives	67
3.3. Research of composite with lightweight aggregates	69
3.3.1. Investigation of lightweight aggregates	69

3.3.2. Influence of lightweight aggregates on kinetics of hydration	70
3.3.3. Macro- and microstructure of thermal insulating composite	71
3.3.4. Density of thermal insulating composite	73
3.3.5. Ultrasonic pulse velocity in thermal insulating composite	74
3.3.6. Compressive strength.....	75
3.3.7. Bending strength.....	76
3.3.8. Thermal conductivity.....	77
3.3.9. Capillary water absorption.....	79
3.3.10. Long-term water absorption.....	82
3.3.11. Deformations due to moisture impact	83
3.3.12. Water vapour permeability	84
3.3.13. Prediction of freeze-thaw resistance according to structure indicators	86
3.3.14. Direct tests for freeze-thaw resistance	88
3.3.15. Combustibility	90
3.4. Conclusions of the third chapter	92
GENERAL CONCLUSIONS	97
REFERENCES	99
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS OF THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113
ANNEXES ¹	129
Annex A. Test graphs of reaction to fire test according to LST EN 13823	130
Annex B. Patent of modified cementitious matrix	131
Annex C. Agreements of co-authors to provide published materials in the dissertation	138
Annex D. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	143

¹ The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Įvadas

Problemos formulavimas

Šiame darbe sprendžiama gamyboje susikaupusių technologinių atliekų utilizavimo problema. Siekiama pritaikyti atliekas naujiems efektyviems termoizoliaciniams kompozitams su lengvaisiais užpildais, skirtiems pastatų atitvarų konstrukcijoms, kurti.

Lietuva neturi pakankamai gamtos išteklių, kad galėtų aprūpinti besiplėtojančią savo statybų pramonę, o turimų išteklių eksploatavimas susiduria su rimtomis technologinėmis ir gamtos apsaugos problemomis, išteklių išgavimas reikalauja didelių investicijų. Dėl didėjančių žaliavų kainų ir nuolat mažėjančių gamtos išteklių, atliekų naudojimas yra potenciali alternatyva Lietuvos statybos pramonėje. Atliekų panaudojimas yra svarbus įvairiais požiūriais – padeda taupyti ir tausoti gamtos išteklius, sumažina aplinkos taršą, taip pat mažina gaminių savikainą.

Pastaraisiais metais, didėjant statybinėms medžiagoms keliamiems reikalavimams, svarbu sukurti perspektyvią naują medžiagą, kuri sėkmingai užtikrintų vandens garų pasišalinimą iš pastato vidaus, būtų nedegi ir nekenksminga žmogaus sveikatai bei tenkintų tokioms medžiagoms keliamus reikalavimus. Tai galima pasiekti naudojant tokių statybinių medžiagų kūrimui metakaolininę atlieką (putstiklio granulių gamybos proceso atlieka), putstiklio granules (iš stiklo duželių) bei trupinto polistireninio putplasčio atliekų granules (iš EPS atliekų).

Darbo aktualumas

Lietuvos pramonėje susidaro įvairių technologinių atliekų, kurių perdirbimo ar pakartotinio panaudojimo galimybės iki šiol nėra galutinai atskleistos. Vienas iš tokių problemų sprendimo būdų yra tokių atliekų utilizavimas panaudojant jas statybiniams kompozitams kurti.

Šių atliekų naudojimas lengviems kompozitams kurti ir gaminti siejamas ne tik su atliekų perdirbimu, bet ir su kompozito savybių gerinimu, statybos išlaidų mažinimu. Termoizoliacinių kompozitų su gamybos atliekomis naudojimas leidžia sumažinti statybos objekte technologinių procesų skaičių – pakeisti daugiasluoksnes atitvarų konstrukcijas viena kompozicine medžiaga.

Termoizoliacinės kompozicinės medžiagos pagamintos su gamybos atliekomis visiškai tenkina esminius statinio reikalavimus, didina pastato energinį efektyvumą, užtikrina gerą patalpų mikroklimatą, yra nekenksmingos žmogaus sveikatai.

Tyrimų objektas

Termoizoliacinis kompozitas iš cementinės matricos, modifikuotas metakaoliniu atlieka (MKA), plastifikuojančia (SPL) bei orą įtraukiančia įmaiša (OII), ir lengvųjų užpildų (putstiklio granulės (PSG), trupinta polistireninio putplasčio atlieka (trupinta EPS atlieka)).

Darbo tikslas

Ištirti modifikuojančių priedų poveikį cementinės matricos struktūrai ir savybėms. Sukurti mažo šilumos laidumo termoizoliacinį kompozitą iš modifikuotos cementinės matricos ir lengvųjų užpildų bei ištirti jo struktūrą ir fizikines bei mechanines savybes.

Darbo uždaviniai

Užsibrėžtam tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti modifikuojančių priedų poveikį cemento tešlos hidratacijos kinetikai bei gautos matricos struktūrai ir fizikinėms bei mechaninėms savybėms.
2. Sukurti termoizoliacinį kompozitą iš modifikuotos cementinės matricos ir lengvųjų užpildų bei ištirti jų poveikį termoizoliacinio kompozito struktūrai ir fizikinėms bei mechaninėms savybėms.

3. Išaiškinti cementinę matricą modifikuojančių priedų veikimo cemento tešloje principą.

Tyrimų metodika

Lengvųjų užpildų, cementinės matricos ir kompozitų fizikinės ir mechaninės savybės nustatytos taikant standartines: tankio, atsparumo suirimui, gniuždymo ir lenkimo stiprio, šilumos laidumo koeficiento, laidumo vandens garams, kapiliarinės vandens įgerties, ilgalaikio vandens įmirčio, degumo, atsparumo šalčiui tyrimų metodikas.

Cemento tešlos hidratacijos kinetika nustatyta pagal „Alcoa“ firmos sukurtą metodiką. Cementinės matricos ir termoizoliacinio kompozito struktūrai vertinti buvo taikomi skenuojančiosios mikroskopijos, rentgenografinės ir ultragarsinės analizės metodai.

Prognozuojamasis eksploatacinis atsparumas šalčiui nustatytas ir apskaičiuotas pagal Lietuvos mokslininkų metodiką (Mačiulaitis 1996; Mačiulaitis *et al.* 2008), nustatant bandinių makrostruktūrinius rodiklius.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatytas cementinę matricą modifikuojančių priedų (metakaolininės atliekos, plastifikuojančios ir orą įtraukiančios įmaišos) bei maišymo trukmės kompleksinis poveikis cementinės matricos struktūrai, hidratacijos kinetikai, tankiui ir stiprumo rodikliams, bei suformuluota cementinę matricą modifikuojančių priedų veikimo cemento tešloje hipotezė. Tai leidžia praplėsti mokslo žinias apie mažo tankio, porėto cemento akmens gamybos technologiją.
2. Panaudojus modifikuotą cementinę matricą ir lengvuosius užpildus, sukurtas naujas termoizoliacinis kompozitas su mažu cementinės matricos kiekiu, užtikrinančiu reikalingą lengvųjų užpildų ir cementinės matricos tarpusavio jungtį bei nustatytos termoizoliacinio kompozito fizikinės ir mechaninės savybės bei struktūra. Taigi, priedų panaudojimas leidžia sumažinti naudojamo cemento kiekį ir užtikrinti geras fizikines ir mechanines kompozito savybes.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Vykdam tarptautinį Eureką projektą E!8790 – „Enclosurewasteconcrete“ sukurti termoizoliaciniai kompozitai iš modifikuotos cementinės matricos su putstiklio granulių ir putstiklio granulių bei trupintos polistireninio putplasčio atliekos lengvuju užpildu, kurie gali būti naudojamos vidutiniškai agresyviomis aplinkos sąlygomis pastatų atitvarų (sienų, pertvarų, stogo, perdangų ir grindų) konstrukcijose.

Termoizoliacinio kompozito gamyboje naudojant metakaolines ir trupintas polistireninio putplasčio atliekas, sprendžiama tokių atliekų pakartotinio perdirbimo problema.

Ginamieji teiginiai

1. Metakaolininės atliekos, plastifikuojantys ir orą įtraukiantys priedai bei maišymo trukmė leidžia reguliuoti termoizoliaciniam kompozitui skirtos cementinės matricos struktūrą, tankį ir fizikines bei mechanines savybes.
2. Priedais modifikuotos cementinės matricos ir lengvųjų (putstiklio granulių ir trupintos polistireninio putplasčio atliekos) užpildų santykis ir užpildų išsidėstymas lemia termoizoliacinio cementinio kompozito struktūrą bei fizikines ir mechanines savybes.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti keturi straipsniai: vienas – mokslo žurnale įtraukta-me į *Thomson Reuters Web of Science* leidinių sąrašą (Šeputytė-Jucikė *et al.* 2014), turinčiame citavimo indeksą, du – tarptautinės duomenų bazės mokslo žurnaluose (Pundienė *et al.* 2014; Šeputytė-Jucikė, Sinica 2016), vienas – recenzuojamoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos medžiagoje (Šeputytė, Sinica 2013).

Disertacijoje pateiktų atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- LMA 5-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Fizinių ir technologinių mokslų tarpdalykiniai tyrimai“, 2015.
- 2-oje tarptautinėje konferencijoje „Innovative materials, structures and technologies“, vykusioje Rygoje 2015 m.
- 22-oje tarptautinėje konferencijoje „Baltic Conference of Engineering Materials & Tribology“, vykusioje Rygoje 2013 m.

- 16-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, vykusioje Vilniuje 2013 m.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir šaltinių bei autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir keturi priedai.

Darbo apimtis yra 111 puslapių, neskaitant priedų ir santraukos, tekste panaudota 40 numeruotų formulių, 48 paveikslai ir 12 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 145 literatūros šaltiniai.

Mokslinių tyrimų apie lengvųjų kompozitų gamybos žaliavas, savybes ir naudojimą analizė

Skyriuje aptariamas cheminių ir mineralinių priedų poveikis cemento akmens savybėms. Analizuojami įvairūs lengvieji užpildai (putstiklio granulės, trupintos polistireninio putplasčio atliekos, perlitas, keramzitas ir kt.), skirti kompozitų tankiui mažinti. Aptariami mokslininkų sukurti lengvieji kompozitai, jų struktūra bei savybės.

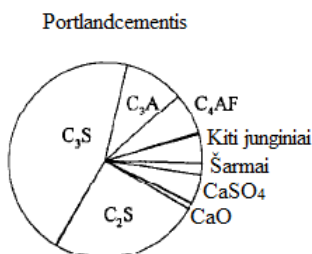
Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Šeputytė-Jucikė, Sinica 2016; Šeputytė-Jucikė *et al.* 2014; Pundienė *et al.* 2014; Šeputytė, Sinica 2013) ir įregistruotas vienas patentas Lietuvos patentų biure (Sinica *et al.* 2015).

1.1. Portlandcementis ir jo hidratacijos procesas

Portlandcementis yra pagrindinė klasikinė hidraulinė rišamoji medžiaga, kurios sudėtyje vyrauja kalcio silikatų mineralai (70–80 %). Portlandcementis gaunamas smulkiai sumalus klinkerį ir tam tikrą kiekį gipso. Klinkeris gaunamas išdegus iki sukepimo smulkiai sumaltą vienalytį žaliavų mišinį, sudarytą iš klinties arba kreidos (kalcio karbonato), molio (aliumosilikatų) ir koreguojančių priedų. Klinkerio kokybė ir techninės savybės priklauso nuo jo cheminės bei minerali-

nės sudėties, taip pat nuo pagrindinių (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) ir kitų (MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 , SO_3) oksidų tarpusavio santykio (Martusevičius *et al.* 2002).

Pagrindiniai komponentai, sudarantys portlandcementį, yra trikalčio silikatas C_3S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), dikalcio silikatas C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), trikalčio aluminatas C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), tetrakalcio aliumoferitas C_4AF ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ir gipsas (CaSO_4).



1.1 pav. Tipinė įprastinio portlandcemenčio sudėtis (Jolicoeur, Simard 1998)

Fig. 1.1. Typical chemical composition of cement (Jolicoeur, Simard 1998)

Sumaišius portlandcementį su vandeniu pirmiausia vyksta cheminės reakcijos (Skripkiūnas 2007). Cemento mineralai su vandeniu sudaro naujus hidratuotus junginius. Vieni mineralai prisijungia vandenį (hidratacijos reakcija) kiti prisijungdami vandenį skyla (hidrolizės reakcija) (Goberis *et al.* 2007)

Cheminės reakcijos tarp pagrindinių cemento komponentų aprašomos 1.1–1.6 lygtimis.

Alito (C_3S) hidratacija (1.1 lygtis) ir hidrolizė (1.2 lygtis):



Alito hidratacijos metu susidaro kalcio hidrosilikatai (C-S-H) ir didelis kalcio hidroksido (portlandito) kiekis.

Belito (C_2S) hidratacija (1.3 lygtis):

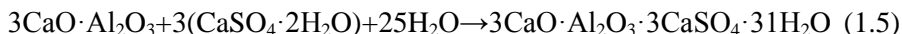


Hidratuojant belitui, susidaro tie patys kalcio hidrosilikatai (C-S-H) kaip ir alito hidratacijos metu. Tačiau, vykstant C_2S hidratacijai, portlanditas nesusidaro.

Trikalcio aluminato (C_3A) hidratacija (1.4 lygtis):



Trikalcio aluminato rišimosi greičiui sumažinti įdedama nuo 3 iki 5 % gamtinio susmulkinto gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) akmenis. Cemente kalcio sulfatui esant dihidračio gipso pavidalo, trikalcio aluminatas hidratuodamas sudaro kompleksinius junginius, vadinamus kalcio hidrosulfoaliuminatais. Šiuo atveju trikalcio aluminato hidratacija sočiajame kalcio hidroksido ir gipso vandeniame tirpale vyksta taip (1.5 lygtis):



Šios reakcijos metu susidaro trisulfatė kalcio hidrosulfoaliuminato forma $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$.

Tetrakalcio aliumoferitas (C_4AF) hidratuojasi pagal 1.6 reakcijos lygtį:



Šios reakcijos metu susidaro kalcio hidroaliuminatai ir hidroferitai. Hidroferitai, kaip ir hidroaliuminatai, su gipsu ir kitomis druskomis gali sudaryti kompleksinius junginius, tokius kaip: $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ arba $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ (Skripkiūnas 2007). Portlandcemenčio komponentų hidratacijos reakcijos produktai pateikti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Portlandcemenčio komponentų hidratacijos reakcijos (Jolicoeur, Simard 1998).

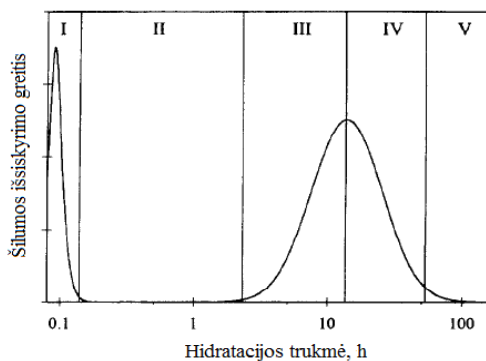
Table 1.1. Hydration reactions for components of Portland cement (Jolicoeur, Simard 1998).

Komponento pavadinimas	Komponento masė, %	Hidratacijos produktas	V/M ^{*)}
C_3S	55	C-S-H, CH	0/24
C_2S	20	C-S-H, CH	0/21
C_3A	6	Monosulfatai	0/80
		Etringitas	2/13
C_4AF	9	$\text{C}_6\text{AFH}_{12}$	0/37
CaSO_4 (tirpus)		$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0/26
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$		$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0/19
CaO		CH	0/32
Įprastinis portlandcementis	-	C-S-H, CH Monosulfatai, etringitas	0/30

^{*)} V/M – vandens ir medžiagos santykis

Cemento akmens struktūros formavimasis nagrinėjamas atliekant kalorimetrijos, mikroskopijos ir rentgenografijos tyrimus. Hidratacijos metu vykstančius procesus galima pavaizduoti kaip šilumos išsiskyrimo greičio funkcijos priklausomybę nuo hidratacijos trukmės. Portlandcemenčio hidratacijos kreivėje (1.2 pav.) galima išskirti penkis periodus (Jolicoeur, Simard 1998):

- I – pradinė hidrolizė (0–15 min);
- II – indukcinis periodas (15 min–4 h);
- III – greitėjimo ir rišimosi pabaigos periodas (4–8 h);
- IV – lėtėjimo ir kietėjimo periodas (8–24 h);
- V – nusistovėjusios būsenos ir kietėjimo periodas (1–28 dienos).



1.2 pav. Portlandcemenčio hidratacijos mikrokolorimetrinė kreivė (Jolicoeur, Simard 1998)

Fig. 1.2. Microcalorimetric curve of the hydration of Portland cement (Jolicoeur, Simard 1998)

Pirmojo hidratacijos periodo metu cemento mineralams kontaktuojant su vandeniu, pirmiausia su vandeniu reaguoja C_3A . Vykstant intensyviai C_3A hidratacijai, būdingas didelis šilumos išsiskyrimo intensyvumo šuolis, po kurio intensyvumas staigiai krinta.

Antrojo hidratacijos periodo metu cemento mineralų hidratacijos greitis būna labai mažas. Dažniausiai tai paaiškinama etringito plėvelių susidarymu aplink cemento mineralus, daugiausia C_3A . Jo metu cemento tešla išlieka plastiška. Šių dviejų pirmųjų hidratacijos periodų trukmė gali būti reguliuojama cheminėmis įmaišomis bei mineraliniais priedais.

Trečiojo periodo metu cemento hidratacijos reakcijos greitėja ir šio periodo pabaigoje pasiekia maksimalų greitį. Cemento tešlos rišimosi pradžios trukmė

maždaug atitinka hidratacijos greičio didėjimo pradžią, o rišimosi pabaigos trukmė – trečiojo periodo pabaigą, t. y. maksimalų hidratacijos greitį.

Ketvirtojo hidratacijos periodo metu cemento hidratacijos greitis (šilumos išsiskyrimo greitis) pastoviai mažėja. Šio periodo metu vyksta C_3S hidratacija – pradžioje aktyviai, vėliau lėtėja, mažėjant nehidratavusio cemento kiekiui.

Penktojo, paskutiniojo, hidratacijos periodo metu susidaro tik nedideli hidratacijos naujų dalių kiekiai. Hidratacijos greitis šiuo periodu daugiausia priklauso nuo difuzijos procesų kietėjančioje cemento tesloje (Scripciuonas 2007; Рамачандрaн 1988).

1.2. Cementinę matricą modifikuojantys pucolaniniai priedai

Cemento akmens struktūrai ir eksploatacinėms savybėms gerinti yra naudojami pucolaniniai priedai. Tai aktyvūs mineraliniai priedai, kurių mineralai kambario temperatūroje reaguoja su portlandintu ($Ca(OH)_2$). Šių reakcijų metu susidaro kalcio hidrosilikatai, hidroaluminatai ir kiti hidratai, kurie didina cemento akmens stiprumą. Pucolaninių medžiagų pagrindiniai aktyvūs komponentai yra Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 (Ramachandran 1995; Donson 1990). Apie šių priedų poveikį betono savybėms yra paskelbta nemažai literatūros šaltinių, įvardijančių jų teigiamą poveikį betono savybėms.

1.2.1. Pucolaniniai priedai ir jų poveikis cemento savybėms

SiO_2 mikrodulkės yra šalutinis silicio arba ferosilicio gamybos produktas. Jos gaunamos redukuojant kvarcinį smėlį arba kvarcitą anglimi lankinėje elektros krosnyje 2000 °C temperatūroje. Reakcijos metu susidaro lakusis SiO , kuris krosnies dūmtraukyje kondensuojasi ir oksiduojasi, virsdamas amorfinės struktūros SiO_2 mikrodulkėmis (Goberis *et al.* 2007).

Pagrindinis cheminis SiO_2 mikrodulkių komponentas yra SiO_2 . Jo kiekis priklauso nuo mikrodulkių gavimo būdo ir svyruoja nuo 61 iki 98 %. Daugiau kaip 95 % SiO_2 mikrodulkių dalelių yra mažesnės nei 1 μm , o savitasis paviršiaus plotas gali būti nuo 13 000 iki 30 000 m^2/kg , piltinis tankis nuo 480 iki 1140 kg/m^3 . Tam tikrą kiekį PC pakeitus SiO_2 mikrodulkėmis, padidinamas gniuždymo stipris, stipris skeliant, atsparumas šalčiui, atsparumas cheminiam poveikiams, sumažinamas kapiliarinis įgėris (Siddique 2011). SiO_2 mikrodulkių panaudojimas ypač didina betono stiprumo savybes (Qing *et al.* 2007). Keičiant PC masę 5, 10 ir 15 % SiO_2 mikrodulkėmis gniuždymo stipris padidėja iki 57 %, tamprumo modulis – iki 14 % (Shannag 2011). Kiti SiO_2 mikrodulkių poveikio betono gniuždymo stipriui tyrimai parodė panašias tendencijas. Mazloom *et al.*

(2004) nustatė, kad SiO_2 mikrodulkių panaudojimas nuo 6 iki 15 % nuo PC masės leido gniuždymo stiprį padidinti iki 21 %. Sobolev (2004) tyrė SiO_2 mikrodulkių kiekio įtaką stiprumo savybėms, kai SiO_2 mikrodulkių kiekis kito nuo 5 iki 20 %. Mokslininkas nustatė, kad 15 % PC dalį pakeitus SiO_2 mikrodulkėmis, gniuždymo stipris padidėjo daugiausia. Amorfinio SiO_2 mikrodulkių teigiamą poveikį cemento mineralo alito hidratacijos procesui tyrė Oertel *et al.* (2014). Gauti rezultatai parodė, kad naudojant SiO_2 mikrodulkes greitinamas hidratacijos procesas. Patartina naudoti SiO_2 mikrodulkes, kurios turi ne patį didžiausią aktyvumą, nes per didelį aktyvumą turinčios SiO_2 mikrodulkės, pagreitinamos hidratacijos reakciją, sumažina stiprumo savybes, nes nespėja sureguoti su cemento hidratacijos metu išsiskyrusiu portlanditu. Autorius Hanojus (2003) pastebėjo, kad SiO_2 mikrodulkių panaudojimas (iki 15 %, kaip dalinis PC keitimas) sumažina mišinių poringumą. Daugiausia poringumas sumažėjo, kai SiO_2 mikrodulkių buvo panaudota 10 % nuo PC masės. Kad SiO_2 mikrodulkių panaudojimas sumažina kapiliarinį poringumą, nustatė ir kiti mokslininkai (Poon *et al.* 2006; Cwirzen, Penttala 2005).

Lakieji pelenai yra dar vienas aktyvus pucolaninis priedas. Tai lengvi, smulkūs milteliai, gauti malant degimo pelenus iš krosnių, kūrenamų susmulkin-tomis anglimis (Rosenberg 2010). Lakiųjų pelenų pagrindiniai cheminiai komponentai yra SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , o kartais ir CaO . Lakiuosius pelenus sudaro dalelės kurių dydis yra nuo 5 iki 300 μm , savitasis paviršiaus plotas nuo 300 iki 500 m^2/kg , piltinis tankis 540–860 kg/m^3 .

Lakiųjų pelenų naudojimas, keičiant cementą iki 40 % masės, turi teigiamą poveikį betono savybėms, jis didina betono tankį iki 19,7 %, sumažina cemento teslos porėtumą, padidina stiprumą ir sumažina V/C santykį (Kwan, Chen 2013). Shannag (2011) teigia, kad, pakeitus 10 % PC masės lakiųjų pelenų priedu, gniuždymo stipris padidėja 18 %. Kapiliarinis vandens įgėris ir bendras vandens įmirkis, keičiant cementą lakiaisiais pelenais, išlieka panašus kaip naudojant vien tik PC (Snelson *et al.* 2011). Betono mechaninės, eksploatacinės ir kitos savybės labiau pagerinamos, kai lakieji pelenai yra naudojami kartu su kitais priedais. Mohammed ir Fang (2011) nustatė, kad gniuždymo stiprį ir betono ilgaamžiškumą didina kompleksinis priedas, sudarytas iš lakiųjų pelenų ir popieriaus atliekos. Panaudojus lakiuosius pelenus kartu su SiO_2 mikrodulkėmis, padidėja gniuždymo stipris, gerinamos mišinių reologinės savybės (Shannag 2011). Kompleksinį pucolaninių priedų poveikį, keičiant jais portlandcementį, taip pat tyrė Celik *et al.* (2014). Nustatyta, kad natūralus pucolaninis priedas, kurio sudėtyje yra aktyvių SiO_2 – 46,48 %, Al_2O_3 – 14,74 % ir Fe_2O_3 – 12,16 %, kartu su lakiaisiais pelenais, kuriuose SiO_2 – 62 % ir Al_2O_3 – 18,9 %, gali būti efektyviai panaudoti gerinant betono mechanines ir reologines savybes.

Malto stiklo milteliai – tai iš stiklo atliekų malimo būdu gautas pucolaninis priedas, pagrindinis cheminis komponentas SiO_2 , jo savitasis paviršius apie

300 m²/kg ir daugiau, dalelių dydis kinta nuo 10 iki 300 μm (Shao *et al.* 2000). Malto stiklo miltelių, kurių dalelių dydis mažesnis nei 25 μm, poveikį betono savybėms, priklausomai nuo aplinkos temperatūrų (10, 23 ir 50 °C), nustatė Mirzahosseini ir Riding (2014). Jų gauti rezultatai parodė, kad kietėjimo temperatūra yra vienas svarbiausių veiksnių, turinčių įtakos šio pucolaninio priedo veikimui. Vykstant hidratacijos reakcijai 50 °C, cemento akmenis stipris padidėja iki 30 %, tačiau esant mažesnei temperatūrai pucolaninė reakcija nevyksta ir stipris sumažėja.

Ankstesni stiklo miltelių tyrimai parodė, kad, pakeitus jais dalį cemento buvo gauti skirtingi rezultatai. Jie priklausė nuo panaudotų stiklo miltelių dalelių dydžio (Aly *et al.* 2012). Kaip pucolaninis priedas stiklo milteliai yra efektyvūs, kai dalelių dydis yra mažesnis nei 100 μm (Madandoust, Ghavidel 2013). Stiklo miltelių priedas, kai dalelių dydis mažesnis nei 75 μm, padidina gniuždymo stiprį, atsparumą sulfatų poveikiui ir chloridų įsiskverbimui. Atlikti autorių Shi *et al.* (2005) ir Schwarz *et al.* (2008) tyrimai parodė, kad stiklo milteliai, kurių dalelių dydis iki 100 μm, yra ne tik aktyvus pucolaninis priedas, bet jo poveikis betonui yra efektyvesnis nei lakiųjų pelenų priedo, keičiant cementą (10–20 %). Stiklo miltelių panaudojimo populiarumą mažina betonuose vykstanti šarmų ir silicio dioksido reakcija dėl stiklo milteliuose esančio didelio kiekio Na₂O, kuris sukelia šarminę betono koroziją. Reakcijos produktas, šarminis silicio gelis, gali sukelti destruktinį eksploatuojamo betono plėtimąsi ir skilimą, tuo sumažindamas betono ilgaamžiškumą (Vaitkevičius *et al.* 2014; Moon *et al.* 2013).

1.2.2. Metakaolinas ir jo poveikis cemento savybėms

Metakaolinas (MK) yra pucolaninės kilmės medžiaga. Jis gaunamas išdegant kaolinito molį nuo 650 iki 800 °C temperatūroje (Saika *et al.* 2002). Šio proceso metu pagrindinis degto molio komponentas – inertinis kaolinitas – dehidratuojasi ir pereina į aktyvų, amorfizuotą metakaolinitą (Al₂Si₂O₇). Nuo kaolino degimo temperatūros ir trukmės priklauso MK cheminė sudėtis ir aktyvumas. Dažniausiai naudojamas MK degtas 2 valandas 700 °C temperatūroje (Rashad 2013).

Pagrindiniai cheminiai MK komponentai yra SiO₂ ir Al₂O₃, mažesni kiekiai yra Fe₂O₃, CaO, MgO, SO₃, Na₂O ir K₂O. MK sudaro 99,9 % dalelių, kurios smulkesnės nei 16 μm, o vidutinis dalelių dydis yra 3 μm (Ambroise *et al.* 1994).

MK panaudojimo skiediniuose pranašumai (Siddique, Klaus 2009):

- padidėjęs gniuždymo ir lenkimo stipris;
- sumažėjęs kapiliarinis vandens įgėris;
- padidėjęs atsparumas cheminiam poveikiui;
- padidėjęs ilgaamžiškumas;
- sumažėjęs šarmų-silicio reakcijos poveikis;

- sumažėjęs susitraukimas;
- geresnė betono spalva ir išvaizda.

MK dėl savo intensyvių pucolaninių savybių yra geras priedas pakeisti dalį portlandcemenčio (PC) betono gamyboje. Khatib *et al.* (2012) savo tyrimais nustatė, kad betono tankis mažėja didėjant MK priedo kiekiui, daugiausia tankis sumažėja naudojant MK iki 30 % nuo PC masės. Visgi kiti eksperimentiniai rezultatai rodo, kad 10 % cemento pakeitimas MK, atsižvelgiant į visas cemento akmens savybes, yra efektyviausias. Toks MK kiekis padidina gniuždymo stiprį iki 10 %, lenkimo stiprį iki 50 %, o poringumą sumažina iki 35 % (Pavliková *et al.* 2009). Esant didesniai nei 30 % MK kiekiui, didėja poringumas ir mažėja stiprumo savybės dėl padidėjusio vandens ir rišamosios medžiagos santykio (V/R) (Larbi, Bijen 1992). Taip pat MK kiekio įtaką betonui tyrė Dinakar *et al.* (2013). Atliekant didelio mechaninio stiprumo betono tyrimus buvo pasirinktas vienodas V/C santykis ir trys skirtingi MK priedo kiekiai (PC masė buvo keičiama 5, 10 ir 15 % MK priedu). Optimalus MK priedo kiekis taip pat buvo lygus 10 %. Toks kiekis 5 % padidino betono gniuždymo stiprį ir 8 % betono skėlimo stiprį. Panašius rezultatus pateikė Li ir Ding (2003), didžiausias gniuždymo stipris buvo pasiektas panaudojus 10 % MK.

MK ypač teigiamai veikia ankstyvąjį betono ir skiedinio stiprumą. MK reaguojant su kalkėmis ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), susidaro hidrogelenitas ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) ir kalcio hidrosilikatai (C-S-H). Dėl didesnio MK, nei kitų pucolaninių priedų, hidratacijos greičio susidarę naujadarai lemia pirminį cemento tešlos kietėjimą ir didesnę gniuždymo stiprį (Kliosova, Golubeva 2013).

MK priedas ne tik padidina betono stiprumo savybes, bet ir sumažina vandens bei chloridų kapiliarinį įmirkį atitinkamai 77 ir 80 %, kartu 30 % sumažindamas bendrąjį betono vandens įmirkį. Toks sumažėjimas vyksta dėl MK dalelių poveikio, kurios, pasiskirsčiusios tarp cemento dalelių, sumažina betono poringumą, o dėl to sumažėja kapiliarinis ir bendrasis vandens įmirkis (Dinakar *et al.* 2013). Khatib ir Clayb (2004) taip pat nustatė, kad keičiant dalį PC 5, 10, 15 ir 20 % MK priedu, kapiliarinis vandens įgerties koeficientas daugiausia sumažėja 50 %, tačiau vandens įmirkis, nors ir nedaug, 1 %, bet padidėja. Batis *et al.* (2005) nustatė, kad betono arba skiedinio mišiniuose keičiant 10 % PC masę MK priedu padidinamas atsparumas korozijai. Didesnis MK priedo naudojimas teigiamo poveikio atsparumo korozijai neturi, tačiau keičiant 25 % PC masę MK, šis priedas tampa geru plastifikuojančios įmaišos pakaitalu ir gali atlikti pagrindines priedo funkcijas, užtikrindamas smulkių betono porų susidarymą, tuo padidindamas betono ilgaamžiškumą (Nicolas, Escadeillas 2014).

Atlikti tyrimai parodė, kad MK savo efektyvumu ir savybėmis yra aktyvesnis priedas nei SiO_2 mikroužpildas, lakieji pelenai ar malto stiklo milteliai. MK pucolaninis aktyvumas yra nuo 610 iki 1150 mg CaO/g, o SiO_2 mikrodulkių pucolaninis aktyvumas yra maždaug 400–450 mg CaO/g (Vu 2002). Taip pat nu-

statyta, kad MK turi pranašumą prieš kitus pucolaninius priedus (išskyrus SiO_2 mikrodulkes) dėl savo smulkumo, kuris svyruoja nuo 12 000 iki 15 000 m^2kg^{-1} , ir mažo dalelių, kurių pagrindinę dalį sudaro 5–10 μm dalelės, dydžio (He *et al.* 1995). Be to, MK gali būti laikomas ekologišku rišikliu, nes jis yra gautas terminio kaolino skaidymosi metu esant daug mažesniai CO_2 emisijos kiekiui, nei cemento klinkerio atveju (Pavliková *et al.* 2009). MK priedo naudojimą dar labiau paskatino jo savikaina. SiO_2 mikrodulkės yra ypač populiarios šiuolaikinėje statyboje, tačiau jo kaina 9–10 kartų didesnė už PC, o gerokai pigesnis MK tapo puikiu SiO_2 mikrodulkių pakaitalu (Dinakar *et al.* 2013).

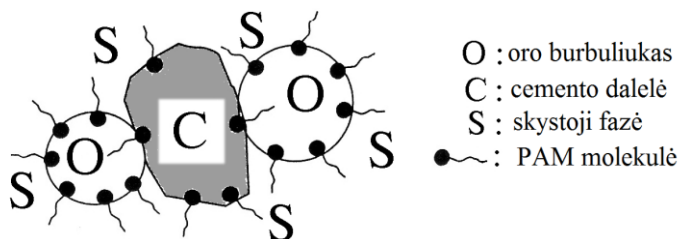
1.3. Orą įtraukiančios įmaišos

Betono tankio mažinimo ir poringos struktūros sudarymo būdai yra du: naudojant dujodarius (medžiaga, kuri kreguodama su rišamąja medžiaga išskiria dujas) ir putokšlius (paviršiaus aktyviosios medžiagos, skystį paverčiančios putomis) (Laukaitis 2000).

Vienas iš nurodytų betono tankio mažinimo (porėtumo didinimo) būdų yra orą įtraukiančių įmaišų naudojimas. Orą įtraukianti įmaiša (OII) didina cemento tešlos porėtumą, dėl paviršiaus aktyvios medžiagos (PAM), kuri tirpsta tirpiklyje arba skystyje (Von Bahr 2003; Salager 2002).

Yra žinoma, kad maišant PC su vandeniu, gaunama cemento tešla, kurioje esančių dalelių mišinys hidratuojasi skirtingu greičiu, o mineralų hidratacijos procesai dengia vieni kitus (Martusevičius *et al.* 2002). Kai į mišinį pridedama OII, maišant ant PC dalelių paviršiaus yra adsorbuojamos katijoninės ir anijoninės PAM molekulės ir užpildo dalelių paviršius (Ramachandran 1995). Priklausomai nuo mišinio maišymo pobūdžio ir paties mišinio savybių, maišymo darbas, kurį sudaro maišyklės menčių sukurinis judesys, bus paverstas oro burbuliukų laisvąja paviršiaus energija (Jezequel, Collin 2007). Įtraukto oro kiekį lemia PAM kiekis, cemento cheminė sudėtis, dalelių granulometrija, mišinio slankumas ir temperatūra bei maišymo sąlygos (Du, Folliard 2005; Kligys 2009). Oro burbuliukų susidarymas yra dinaminis procesas, kurio metu susidaro nauji oro burbuliukai, o senesni suyra. Oro burbuliukai cemento tešloje iš prigimties yra nepatvarūs (Canadian Patent 2611895).

Susidarę oro burbuliukai, paveikti PAM, sukimba su hidratuoto cemento dalelėmis, kurių masė padeda disperguoti oro burbuliukus mišinyje ir mažina jų polinkį slinkti prie paviršiaus. Kartu oro burbuliukų flotacijos jėga mažina dalelių nusėdimo galimybes ir greitį (Mielenz *et al.* 1958). Oro burbuliukų ir cemento dalelės sukibtis parodys 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Oro burbuliukų ir cemento dalelių sąveika (Du, Folliard 2005)

Fig. 1.3. Interaction between air bubbles and cement particles (Du, Folliard 2005)

Donson (1990) atkreipė dėmesį į tai, kad cemento tešlos porizacijos procese svarbų vaidmenį vaidina vanduo. Vandens kiekis daro tiesioginį poveikį betono mišinio slankumui. Didėjant slankumui cemento tešla geba įtraukti didesnį oro kiekį ir kartu didinti jos porėtumą. Jei betono mišinio slankumas viršija 150 mm, didesni oro burbuliukai dėl plūdumo jėgų pasidaro mažiau stabilūs ir bendras oro kiekis betono mišinyje sumažėja.

Pastaruoju metu cementinės pastos mišiniams paruošti plačiai naudojami anijoninių funkcinų sulfo–grupių PAM. Kligys (2009) savo disertaciniame darbe plačiai išnagrinėjo anijoninių funkcinų grupių OII ir jų veikimo principą, bei siūlė pasirinkti efektyviausią orą įtraukiančią įmaišą natrio alkenų sulfonato pagrindu – Ufapore TCO.

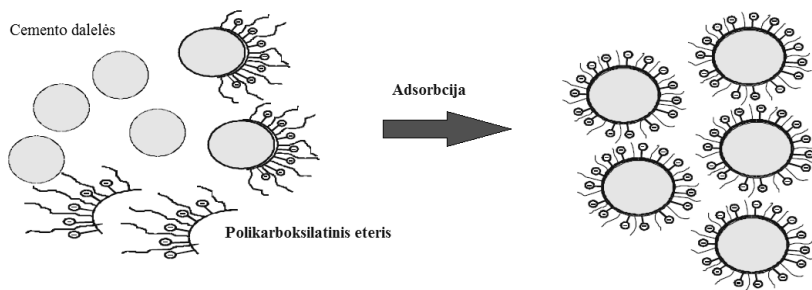
1.4. Superplastikliai

Superplastikliai priklauso labiausiai paplitusių didelio veiksmingumo įmaišų, naudojamų betono gamybai, grupei. Pagrindiniai superplastiklių pranašumai yra šie (Ramachandran 1995; Anagnostopoulou, Echonomidis 2015):

- sumažina vandens poreikį betonui ruošti iki 30 %, o sumažėjęs V/C santykis labai padidina tiek pirminį, tiek galutinį betono stiprumą; padidina sklidumą be papildomo vandens kiekio;
- turi poveikį betono hidratacijos procesui;
- padeda sutankinti betoną, mažėja betono tešlos segregacija;
- sumažina linijines deformacijas (džiūstamąjį susitraukimą ir plėtrą);
- sumažina vandens įmirkį, atsparumą karbonatų ir chlorido poveikiui, ilgaamžiškumą ir sukibimą tarp plieno ir betono;
- suderinami su visais portlandcemenčio tipais.

Betono savybėms gerinti naudojami įvairūs plastikliai: lignosulfonatai, melamino dervos, formaldehido dervos, poliakrilatai, lignosulfonatai, polikarbonsilatiniai plastikliai (Papo, Piani 2004; Navarro-Blasco *et al.* 2014; Ferrari *et al.*

2010). XX a. pabaigoje buvo sukurtos naujo tipo superplastifikuojančios įmaišos polikarboksilatinio eterio pagrindu, kurios stipriau suskystino betono mišinį ir sumažino jo išsisluoksniavimą, nei anksčiau žinomos įmaišos. Dėl šios priežasties minėtos įmaišos išstumia žinomas plastifikuojančias įmaišas melamino ir naftelino pagrindu. Polikarboksilatinio eterio pagrindu pagamintų superplastiklių veikimo principas – elektrostatinis, bei erdvinis dispergavimas. Polikarboksilato molekulė susideda iš vienos pagrindinės polimerinės grandies su šoninėmis karboksilinių ir eterinių grupių atšakomis (Миленин 2014). Karboksilinės grupės turi svarbų vaidmenį absorbuojant polikarboksilatus ant cemento dalelių. Šios įmaišos disperguojantis efektas įvyksta ne vien dėl elektrostatinio dalelių atstūmimo, kaip naudojant melaminines arba naftalines įmaišas, o pirmiausia dėl erdvinio atstūmimo, susijusio su ilgomis eterinėmis grandimis (1.4 pav.) (Wutz 2011).



1.4 pav. Elektrostatinės dispersijos schema (Wutz 2011)

Fig. 1.4. Scheme of the electrostatic dispersion (Wutz 2011)

Ypač plačiai ugniai atsparaus betono gamyboje su aluminatiniais cementais yra naudojami šio tipo superplastikliai, kurių veikimas efektyvesnis nei įprastinių plastiklių. Polikarboksilatinio eterio pagrindu pagamintų superplastiklių didelis skystinamasis poveikis cemento rišamosioms medžiagoms, pasiekiamas esant mažam V/C santykiui, sąlygoja rišamosios medžiagos ankstyvojo stiprio padidėjimą ir savaime susitankinančių mišinių reikiamos struktūros susidarymą be vibracijos. Taip pat polikarboksilatiniai plastikliai iki 50 % padidina betono tešlos sklidimą, 1 % sumažina vandens sąnaudas, kartu pagerina fizikines ir mechanines savybes, lyginant juos su įprastiniais plastikliais (Routschka *et al.* 2000). Apie polikarboksilatinio eterio pagrindu pagamintų superplastiklių panaudojimą portlandcemenčio pagrindu pagamintiems betonams duomenų yra labai mažai. Dėl stipresnio poveikio betonui arba cementinei rišamajai medžiagai šio tipo plastikliai naudojami gerokai mažesniais kiekiais (Миленин 2014).

Savo moksliniuose darbuose Ferraris (2001), Ozawa ir Ouci (2001), Hewlett ir Rixom (1977) tyrė polikarboksilatinio eterio pagrindu pagamintų superplastik-

lių poveikį cemento mišinio mechaninėms, mineraloginėms, mikrostruktūros ir reologinėms savybėms. Rezultatai parodė, kad šių įmaišų panaudojimas sulėtina cemento hidrataciją ankstyvuojant kietėjimo periodu. Šių plastiklių panaudojimas taip pat lėmė struktūros pokyčius ir C-S-H gelio sudėtį. Polikarboksilatinio eterio pagrindu pagaminto superplastiklio panaudojimas sukėlė mikrostruktūrinius cemento mišinio pokyčius, kurie pasireiškė nedideliu porėtumo sumažėjimu. Taip pat panaudotas nedidelis kiekis superplastiklio sumažino betono takumą daugiau nei 70 %. Nustatant naujos kartos superplastiklių poveikį fizikinėms bei mechaninėms savybėms ir klampai aptikta, kad cemento skiediniuose panaudojus naujos kartos superplastiklius sumažėja vandens kiekio poreikis ir padidėja mechaninis stipris (Anagnostopoulou 2014; Golaszewski 2007).

Bendrovė BASF sukūrė daug polikarboksilato pagrindu pagamintų superplastiklių, kurie naudojami ugniai atsparių betonų gamybai, t.y. FS-10, FS-20, FS-40. Jų naudojimas reglamentuotas taip: FS-10 – skirtas betonui be SiO_2 mikrodulkių priedo, FS-20 – skirtas visiems ugniai atspariems betonams su SiO_2 mikrodulkių priedu ir FS-40 – skirtas mažacemenčiam betonui ir ypač mažą cemento kiekį turintiems betonams (Aleksnevičius 2010). Apie šių įmaišų panaudojimą betonams su portlandcemenčio rišamąja medžiaga literatūros šaltiniuose pateikta nėra.

Polikarboksilatinio eterio pagrindu pagamintų superplastiklių įtaką porėtam betonui tyrė Gorzelanczy ir kiti mokslininkai. Tyrimų rezultatai parodė, kad superplastiklio įmaiša ne tik padidina porėto betono stiprumo rodiklius, bet ir turi įtakos betono porų susidarymui, jų tūriui, struktūrai ir stabilizavimuisi (Gorzelanczy, Hala 2011; Lazniewska-Piekarczyk 2014; Duan *et al.* 2013).

1.5. Lengvieji užpildai

Statybinių medžiagų gamyboje naudojami natūralūs ir dirbtiniai lengvieji užpildai. Lengvieji užpildai yra gaunami arba gaminami iš natūralių žaliavų (šlakas, pema, keramzitas, perlitas, vermikulitas) ir iš atliekų (putstiklio granulės, technologinių atliekų granulės, polistireninio putplasčio (EPS), poliuretano, plastiko granulės ir kitos granuluotos neorganinės ar sukeptos polimerinės medžiagos) (Kockal, Ozturan 2011; Harun 2009; Naujokaitis 2006). Dėl didelio poringumo lengvųjų užpildų stiprumas būna kur kas mažesnis, negu sunkiųjų užpildų. Be to, jie turi didesnę savitąją paviršių ir pasižymi didesniu vandens įmirkiu (Ščenulevičius 1988).

1.5.1. Lengvieji užpildai iš mineralinės kilmės žaliavų

Perlitas yra vulkaninės kilmės uoliena, t. y. vulkaninis stiklas, į kurio sudėtį įeina 2–6 % vandens. Kai jis staigiai kaitinamas 900–1100 °C temperatūroje, vanduo

atsiskiria nuo mineralo struktūros ir susidarę garai mineralo viduje suformuoja akytą (8–40 %) struktūrą (Gailius *et al.* 2010).

Vermikulitas yra magnio ir kalcio hidroaliumosilikatas, t. y. molio mineralas, turintis sluoksniuotą struktūrą. Kai jis yra kaitinamas iki 800–1100 °C, tarpsluoksninis vanduo virsta garais ir gaunama išpūsta struktūra, kurios tūris, palyginti su pradiniu medžiagos tūriu, padidėja 25 kartus (Berge 2009).

Keramzitas gaunamas degant natūralų molį sukamosiose krosnyse 1150 °C temperatūroje. Esant tokiam karščiui žaliavos gabaliukai išsipučia ir tampa lengvomis, porėtą struktūrą bei tvirtą lukštą turinčiomis granulėmis.

Pūstos mineralinės kilmės granulės – tai užpildai, pagaminti iš mineralinių medžiagų, fluso agentų ir putinimo medžiagos. Apdorojus žaliavas ir supylus sudedamąsias medžiagas, granulės yra degamos ir putinamos (Mueller *et al.* 2008).

Aglomeruoti lakieji pelenai yra gaminami iš anglies dulkių degimo metu susidarantių lakiųjų pelenų, į kuriuos įpilamas tam tikras kiekis vandens ir šis mišinys granuliuojamas bei degamas ~1200 °C temperatūroje. Tokia temperatūra leidžia lakiesiems pelenams sudaryti didesnius junginius. Porėta struktūra susidaro dėl naudojamo vandens, garavimo ir anglies pašalinimo degimo metu.

Daugiausia naudojamų lengvųjų užpildų iš natūralių ir dirbtinių medžiagų savybės pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Lengvųjų užpildų iš natūralių medžiagų ir atliekų savybės (Mueller *et al.* 2008).

Table 1.2. Properties of lightweight aggregates from natural and waste materials (Mueller *et al.* 2008).

Lengvųjų užpildų savybės	Lengvieji užpildai gauti iš natūralių resursų		Lengvieji užpildai gauti perdirbant atliekas		
	Perlitas ir vermiculitas	Keramzitas	Putstiklio granulės	Pūstos mineralinės granulės	Aglomeruoti lakieji pelenai
Degimo temperatūra, °C	~900	1100–1200	750–900	<1000	1000–1300
Tankis, kg/m ³	32–400	160–850	190–300	150–400	710–1400
Šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K)	0,04–0,06	0,08–0,012	0,07	0,09	0,07

1.5.2. Putstiklio ir polistireninio putplasčio granulės

Daugelį metų stiklas buvo plačiai naudojamas įvairiais tikslais ir tapo labai svarbi pramonės medžiaga. Bendras metinis vidaus stiklo produktų sunaudojimas Europoje yra maždaug 8,4 milijonai tonų, iš kurių lakštinis stiklas langams sudaro apie 36 %, stiklo pluošto produktai – 6 %, ir vienkartiniai indai, pavyzdžiui, buteliai ir t. t., apie 58 % (Craig *et al.* 2012). Kaip galima matyti, dėl didelio anterinės žaliavos, t. y. stiklo, kiekio putų stiklas kaip užpildas turi didžiuosius perspektyvas.

Stiklo atliekos gali būti perdirbtos į konkrečias medžiagas. Iš stiklo miltelių yra gaminami trijų rūšių termoizoliaciniai gaminiai: putstiklio termoizoliacinės plokštės, putstiklio skalda, putstiklio granulės (Hurley 2003). Putstiklį sudaro dujinė ir kietoji fazė. Oro tarpai – tai poros, atskirtos viena nuo kitos plona stiklo plėvele. Putstiklio tūrį sudaro mažiau nei 10 % kietosios fazės, būtent todėl jo tankis yra mažas (Gailius *et al.* 2010).

Putstiklio granulės (PSG) gali būti perspektyvus užpildas kuriant lengvuosius betonus (kompozitus). PSG yra dirbtinis užpildas, paprastai pagamintas iš perdirbto stiklo. Jos yra smulkiai akvata statybinė medžiaga (poringumas siekia 85–90 %), kuri yra lengva, atspari liepsnai, turi puikias šilumines savybes (žr. 1.2 lentelę), lengvai apdorojama, pasižymi gera garso izoliacija, atspari drėgmei bei ilgaamžiška. Taip pat pasižymi dideliu silicio dioksido kiekiu, nelygiu paviršiumi, yra ekologiška švari medžiaga, padedanti saugoti aplinką. Todėl PSG tiek smulkesnio, tiek stambesnio dydžio gali būti sėkmingai naudojamos kaip termoizoliacinis užpildas (Limbachiya *et al.* 2011; Hurley 2003, Jasaitienė *et al.* 2010).

Polistireninis putplastis (EPS) – tai standi akvatojo plastiko medžiaga, pagaminta sulydant išpūsto polistireno arba vieno iš jo kopolimerų rutuliukus arba granules, turinti oro pripildytą uždara akvatają struktūrą (LST EN 13163). Lengviesiems betonams gali būti naudojamos trijų rūšių EPS granulės: trupintos, smulkios ir stambios (Gailius *et al.* 2010).

Pastaraisiais metais visame pasaulyje didėja plastiko vartojimas. Kartu su stiklo atliekomis kaupiasi ir dideli kiekiai putų polistireno pakavimo taros atliekų. Tai lemia didelį plastikinių atliekų kiekio susidarymą. Tokių atliekų perdirbimas ir panaudojimas naujoms medžiagoms (pvz., betonui ar skiediniui) gaminti atrodo kaip vienas iš geriausių sprendimo būdų dėl ekonominių ir ekologinių pranašumų (Hassani *et al.* 2005). Polistireninio putplasčio taros atliekos yra smulkinamos nuo 20,0 iki 1,0 mm dydžio granulių ir naudojamos kompoziciniams medžiagoms kurti dėl savo mažo tankio ir šilumos laidumo koeficiento (Kligys 2009).

Abejos atliekos – stiklo ir EPS – priskiriamos prie inertinių, kaip, pavyzdžiui, betonai, mūro gaminiai ir kitos atliekos, kuriose nevyksta jokie pastebimi fizikiniai, cheminiai ar biologiniai pokyčiai. Todėl abi medžiagos (iš stiklo atlie-

kų gautos PSG granulės ir trupintos EPS atliekos) puikiai tinka lengvųjų kompozitų gamybai, nes yra gerinamos legvųjų betonų fizikinės, mechaninės ir eksploatacinės savybės ir utilizuojamos atliekos. Be to, PSG ir EPS pagrindu gaminami gaminiai bus produktai, kurių mažesnis kenksmingas poveikis aplinkai, palyginti su analogiškais produktais, kurių, pavyzdžiui, keramzito, vermikulito ir pan. gamybai reikia iškastinių ir energetinių resursų.

1.6. Lengvieji kompozitai

Šiuolaikinė statybos pramonė siekia pagerinti betono tvarumą didindama perdirbtų arba pagamintų užpildų naudojimą jo gamybai. Labai didelė termoizoliacinių statybinių medžiagų paklausa paskatino mažo tankio užpildus panaudoti gaminant lengvuosius kompozitus. Lengvasvorės atliekos ir kiti šalutiniai produktai, tinkamai apdoroti, gali būti veiksmingai panaudoti kaip statybinės medžiagos (Limbachiya *et al.* 2012).

Mažo tankio cemento kompozitai yra gaminami naudojant lengvus poringuosius užpildus, porodarius, kurie užtikrina porų susidarymą cementinėje matricoje, arba naudojant abu šiuos būdus kartu. Autoriai Wang *et al.* (2013) išskiria tris lengvųjų betonų tipus: lengvųjų užpildų betonas (didžiausia dalis oro tuštumų yra užpilduose), akytas ir putų betonas (oro tuštumos yra cementinėje matricoje) ir stambiaporis betonas be smulkių dalelių (smėlis pašalinamas ir oro tuštumos yra tarp stambiaus užpildo dalelių) (Wang *et al.* 2013).

1.6.1. Akytųjų cementinių kompozitų eksploatacinės savybės

Šilumos laidumas yra svarbi bet kurios rūšies betono savybė, ypač tai pasakytina apie pastatus, kuriems keliama mažo šilumos laidumo reikalavimai. Betonai, kurio šilumos laidumo koeficientas mažas, gali pakeisti esamas termoizoliacines medžiagas (Xu, Chung 2000). Tokie betonai gali turėti plataus diapazono (0,06–0,36 W/(m·K)) šilumos laidumo koeficientą. Betonų šilumos laidumas priklauso nuo naudojamų užpildų, aplinkos drėgmės ir temperatūros sąlygų (Lamond, Piellert 2006; Kim *et al.* 2003; Fu, Chung 1997). Didelis naudojamo cemento kiekis ir didelis naudojamų užpildų šilumos laidumas lemia didelį betono šilumos laidumą (Gu *et al.* 1997; Uysal *et al.* 2004). Bouguerra ir kiti mokslininkai nustatė, kad betono šilumos laidumas kinta – priklauso nuo jo poringumo. Kai bandinyje uždara oro poros pakeičiamos tam tikru vandens arba drėgmės kiekiu, betono gaminyje turi didesnę šilumos laidumo koeficientą. Kadangi vandens šilumos laidumas 25 kartus didesnis nei oro, didėjant drėgmės kiekiui betono gaminyje didėja ir šilumos laidumo koeficiento vertė (Ashworth, Ashworth 1991; Short, Kinniburgh 1978; Morabito 1989). Steiger Hurd nustatė, kad kai betono svoris dėl

vandens absorbcijos padidėja 1 %, šilumos laidumas padidėja 5 % (Steiger, Hurd 1978). Didelį poveikį betono fizikinėms savybėms daro į betoną įtrauktas oro kiekis. Skirtingos priklausomybės tarp tankio ir šilumos laidumo dydžių betoniniuose gaminiuose atsiranda dėl skirtingo poringumo, prisipildžiusios oro poros nepadidina betono tankio, bet porėto betono šilumos laidumas priklauso nuo susidariusių porų struktūros ir oro kiekio jame. Akyto betono savybės ir struktūrą nagrinėję autoriai teigia, kad, priklausomai nuo įtraukto oro kiekio, betono tankis gali didėti nuo 400 iki 700 kg/m³, o gniuždymo stipris didėja nuo 1,3 iki 8,5 MPa, šilumos laidumo koeficientas kinta nuo 0,07 iki 0,21 W/(m·K). Tankio didinimas iki 1000 kg/m³ lydimas šilumos laidumo koeficiento didėjimo iki 0,4 W/(m·K) (Short, Kinniburgh 1978).

Džiūstamasis susitraukimas yra laikomas vienu iš akyto betono trūkumų, jis paprastai vyksta per pirmąsias 20 dienų nuo betono pagaminimo (McGovern 2000). Akyto betono, kietėjusio natūraliomis sąlygomis, džiūstamasis susitraukimas yra tarp 0,1 ir 0,35 % nuo bendros apimties suketėjusios betono matricos (Roslan *et al.* 2013). Be to, akyto betono džiūstamasis susitraukimas laikomas 4–10 kartų didesniu nei įprasto betono ir priklauso, nuo naudojamų užpildų tipo, skirtingo V/C santykio ir panaudotų mineralinių priedų. Norint sumažinti džiūstamąjį susitraukimą, yra rekomenduojama sumažinti V/C santykį, taip pat pasirinkti tinkamą orą įtraukiančią įmaišą ir panaudoti lengvuosius užpildus (Amran *et al.* 2015).

Atlikti tiriamieji darbai rodo, kad akyto betono atsparumas ugniai priklauso nuo sudedamųjų komponentų ir mišinio proporcijų. Mažėjant akyto betono tankiui, atsparumas ugniai proporcingai didėja. Akyto betono priešinimosi ugniai diapazonas artimas tokiam normalaus betono diapazonui. Betonai, kurio tankis yra nuo 950 iki 1200 kg/m³, gali atlaikyti ugnies poveikį nuo 2 iki 3,5 h (Sach, Seifert 1999). Vilches *et al.* autoriai (2012) nustatė, kad akyto betono, kurio tankis 400 kg/m³, atsparumas ugniai buvo tris kartus mažesnis nei 150 kg/m³ tankio betono. Cemento sudėtis taip pat gali turėti poveikį porėtam betonui esant aukštesnėse temperatūrose. Kerslis ir Mostert (2005) teigia, kad akytas betonai, kuriame hidraulinio cemento Al₂O₃/CaO santykis didesnis kaip du, gali atlaikyti 1450 °C temperatūrą be pastebimų pažeidimų.

1.6.2. Cementinių kompozitų su lengvaisiais užpildais eksploatacinės savybės

Lengvųjų betonų šilumos laidumas gali būti sumažinamas naudojant vieną ar kelias mažo tankio medžiagas. Keramzitas, vermikulitas, pemza yra dažniausiai naudojami lengvųjų betonų mišiniuose (Lo *et al.* 2007, Yun *et al.* 2013). Tiek mechaninės, tiek šiluminės savybės yra labai svarbios nustatant lengvųjų kompozitų naudojimo sritį. Jeigu lengvieji užpildai yra labai atsparūs trypinimui (iki

12 MPa), galima sukurti lengvąjį konstrukcinį betoną (Zareef 2010). Lengvuosiuose betonuose ar skiediniuose gniuždymo stipris bei šilumos laidumas priklauso nuo kompozito tankio. Lengvojo kompozito gniuždymo stipris didėja didėjant jo tankiui, o šilumos laidumo vertė mažėja mažėjant jo tankiui (Yu *et al.* 2013).

Lengvojo betono tankis priklauso nuo porizuojančių įmaišų panaudojimo, sudėtinių betono komponentų santykio ir nuo lengvųjų užpildų tankio bei kiekio. Betono tankį įmanoma sumažinti naudojant legvuosius užpildus ir orą įtraukiantį priedą bei suformuojant iki 70 % porizuotą matricos struktūrą, palyginti su įprastiniu betono tankiu (ACI Committee 2011; Mehta, Monterio 1993; Neville 1995). Yra atlikta nemažai mokslinių darbų, skirtų įvairių lengvųjų užpildų naudojimui, siekiant pagerinti lengvojo betono eksploatacines savybes.

Demirboga ir Gul (2003) tyrė legvąjį betoną, kuriame pemzos užpildas buvo keičiamas pūsto perlito lengvuju užpildu (20, 40, 60, 80 ir 100 %). Nustatyta, kad pemzos keitimas pūsto perlito lengvuju užpildu buvo efektyvus dėl šilumos laidumo sumažėjimo. Šis sumažėjimas vyko dėl mažo pačių pūsto perlito granuliu šilumos laidumo ir sumažėjusio lengvojo betono tankio. Sukurtų kompozitų tankis kito nuo 1150 iki 450 kg/m³, šilumos laidumo koeficientas – nuo 0,30 iki 0,16 W/(m·K). Taip pat buvo tirtas kompozito šilumos laidumo koeficientas, kai kompozitas buvo sudarytas iš pūsto perlito ir pemzos lengvųjų užpildų bei modifikuotos cementinės matricos (keičiant 10, 20 ir 30 % cemento masę vienu atveju SiO₂ mikrodulkėmis, kitu atveju – lakiųjų pelenų priedu). Didžiausias šilumos laidumo koeficientas 0,318 W/(m·K) buvo gautas naudojant vien tik pemzos užpildą ir cementinę matricą be priedų. Šilumos laidumas mažėjo didėjant cementinę matricą modifikuojančių SiO₂ mikrodulkių ir lakiųjų pelenų priedų kiekiui. Mažiausia šilumos laidumo vertė, 0,147 W/(m·K), buvo gauta bandinių, kurie buvo suformuoti keičiant 70 % pemzos užpildą pūsto perlito užpildu ir 30 % cemento buvo pakeista lakiųjų pelenų priedu. Abu cementinę matricą modifikuojantys priedai, tiek SiO₂ mikrodulkės, tiek lakiųjų pelenų priedas, skatino lengvojo betono šilumos laidumo mažėjimą. Pūsto perlito užpildo naudojimas vietoj pemzos užpildo šilumos laidumo koeficiento vertę sumažino iki 43,5 %, o mikrodulkių ir lakiųjų pelenų priedo naudojimas – iki 15 % (Demirboga, Gul 2003).

Betono savybių tyrimas, kuriame buvo naudojamas dviejų tipų cementas (CEM II 32.5R ir CEM I 42.5R), parodė, kad minimalus betono tankis (1800 kg/m³) buvo gautas pridėjus 300 kg/m³ CEM II 32.5R, o kompozito, kurio sudėtyje pūsto perlito užpildas siekė 30 %, gniuždymo stipris, atsižvelgiant į cemento rūšį, buvo tarp 20 ir 30 MPa. Taip buvo įrodyta, kad pūstas perlitas, tinkamai parinkus jo kiekį, gali būti naudojamas kaip lengvojo betono užpildas, nepaisant kai kurių mechaninių savybių nuostolių, bet atsižvelgiant į geresnes šilumos laidumo savybes (Topçu, Işıkdag 2008). Panašius tyrimus atliko Sengul

et al. (2011) mokslininkai. Jie nustatė, kad, keičiant įprastinį užpildą nuo 20 % (įprastinis betonas) iki 100 % pūsto perlito užpildu, galima sukurti lengvąjį betoną, kurio tankis kinta nuo 2015 iki 696 kg/m³, gniuždymo stipris nuo 28,8 iki 0,1 MPa, o šilumos laidumo koeficientas nuo 0,6 iki 0,13 W/(m·K).

Tokie pranašumai kaip mažas tankis, mažas šilumos laidumas ir atsparumas ugniai leidžia lengvąjį betoną naudoti įvairios paskirties pastatuose. Atlikti Al-duaij *et al.* (1999) tyrimai parodė, kad, naudojant keramzitą kaip lengvąjį užpildą, galima sukurti kompozitus, kurių gniuždymo stipris svyruoja nuo 15,5 iki 29,0 MPa, o cemento kiekis didėja nuo 250 iki 300 kg/m³, esant 1500 kg/m³ tankiui. Gumos dalelių poveikį cemento kompozitų šilumos laidumui tyrė Benaz-zouk *et al.* (2008). Naudojant gumos daleles cemento kompozite, pastebimas aiškus šilumos laidumo sumažėjimas. Kai naudojama 50 % (mišinio masės) gumos dalelių, gaunamas kompozitas, kurio šilumos laidumo koeficientas 0,47 W/(m·K), gniuždymo stipris 10,5 MPa, lenkimo stipris 3,25 MPa, o tankis 1150 kg/m³. Ünal *et al.* (2007) mokslininkai, naudodami diatomitą kaip lengvąjį betono užpildą, sukūrė vidutinio sunkumo betono blokus, kurių gniuždymo stipris po 28 dienų kietėjimo buvo apie 3,5–6,0 MPa, o tankis 950–1200 kg/m³. Nustatyta kompozito tiesinė priklausomybė tarp panaudoto cemento kiekio ir šilumos laidumo koeficiento parodė, kad šilumos laidumas padidėja nuo 0,22 iki 0,30 W/(m·K), kai cemento kiekis padidinamas nuo 250 iki 400 kg/m³.

Lengvųjų betonų vandens įmirkis ir kapiliarinis vandens įgerties koeficientas priklauso nuo naudojamų lengvųjų užpildų tipo, jų kiekio, V/C santykio ir rišamosios medžiagos kiekio. Kuo mažesnis lengvųjų kompozitų tankis ir didesnis V/C santykis, tuo didesnis vandens įmirkis (Saikia, Brito 2012). Tai patvirtina ir kiti autoriai, nurodydami, kad didesnis V/C santykis sukelia didesnę poringumą ir, kartu, vandens įmirkį (Silva *et al.* 2013; Kligys 2009). Albano *et al.* (2010) nustatė, kad vandens įmirkis didėja didinant užpildų frakcijos dydį ir V/C santykį. Kai V/C santykis pastovus, lengvųjų betonų vandens įmirkio didėjimą lemia didėjantis užpildo kiekis dėl bendrojo poringumo padidėjimo (Liu *et al.* 2010). Sengul *et al.* (2011) mokslininkai ištyrė, kad, esant pastoviam V/C santykiui, keičiant natūralų betono užpildą (smėlį) pūsto perlito užpildu nuo 20 iki 100 % (bandinių tankis kito nuo 1900 iki 350 kg/m³), vandens įmirkis padidėjo nuo 10 iki 80 %, kapiliarinis vandens įgerties koeficientas taip pat padidėjo, tik ne taip smarkiai kaip vandens įmirkis – nuo 0,12 iki 0,41 (10⁻³ cm/s^{0,5}). Panašius tyrimus atliko ir Khonsari *et al.* (2010). Šie autoriai nustatė, kad, keičiant natūralų betono užpildą perlito užpildu iki 40 %, vandens įmirkis padidėja nuo 1,25 iki 10,56 %. Turkmen ir Kontarci (2007) teigia, kad, keičiant iki 15 % natūralų betono užpildą pūsto perlito užpildu, kapiliarinis vandens įgerties koeficientas padidėja iki 42 %. Toks padidėjimas atsiranda dėl padidėjusio poringumo ir susisiekiančių kapiliarų kontakto zonose tarp užpildo ir cemento akmens. Atlikti Sinicos *et al.* (2008) lengvojo betono su EPS užpildu kapiliarinės vandens įger-

ties tyrimai rodo, kad, varijuojant bandinių tankiui nuo 150 iki 350 kg/m³, kapiliarinio įgėrio koeficientas kito nuo 1,5 iki 0,47 g/m²s. Pateikti gamintojo (UAB „Aeroc“) artimų tankio verčių duomenys rodo, kad, esant lengvojo betono tankiui 425 kg/m³, kapiliarinio įgėrio koeficientas siekia 1,1 g/m²s, kai tankis 375 kg/m³ – 1,04 g/m²s, ir esant tankiui 300 kg/m³ – 0,986 g/m²s.

Betono su lengvaisiais užpildais džiūstamojo susitraukimo dydis priklauso nuo medžiagos tankio, naudojamų užpildų tipo, makrostruktūros ir kitų veiksnių (Sinica 2001). Kou *et al.* (2009) nustatė, kad, naudojant plastiko atliekas kaip lengvąjį betono užpildą, galima sumažinti džiūstamąjį susitraukimą – keičiant dalį natūralaus betono užpildo nuo 5 iki 45 %, džiūstamasis susitraukimas po 10 parų sumažėjo iki 67,3 %. Tačiau naudojamas poliuretano užpildas džiūstamąjį susitraukimą padidina 8,1 %, palyginti su įprastinio betono susitraukimu (Fraj *et al.* 2010). Panašios tendencijos matyti ir naudojant EPS užpildą. Chen ir Liu (2004) nustatė, kad, keičiant įprastinį betono užpildą EPS granulėmis nuo 25 iki 55 %, lengvojo betono džiūstamasis susitraukimas padidėja 50 %. Nemes (2006) nustatė, kad lengvasvoriuose betonuose pakeitus natūralų betono užpildą 47 % PSG ir keramzito užpildu, džiūstamojo susitraukimo rezultatai yra beveik vienodi. Priklausomai nuo cementinės matricos kiekio (kuris kito nuo 262 iki 460 kg/m³), džiūstamasis susitraukimas (po 10 parų), didinant cemento kiekį, didėjo nuo 5 iki 20 %.

Kompozicinių medžiagų vandens garų pralaidumas taip pat yra labai svarbi savybė, siekiant užtikrinti mikroklimatą patalpose. Jei medžiaga nepralaidi vandens garams, vanduo kondensuojasi ant sienų, susidaro pelėsiai – grybai. Lengvųjų betonų vandens garų pralaidumą galima pagerinti naudojant mažo tankio užpildus. Vandens garų pralaidumo tyrimus, naudojant skirtingo tankio užpildus, tyrė Ducman ir Mirtič (2014). Rezultatai parodė, kad, naudojant lengvuosius užpildus, kurių tankis kito nuo 1320 iki 1860 kg/m³, vandens garų varžos faktorius kito nuo 18 iki 32. Lengvųjų užpildų naudojimas leido keturis kartus sumažinti vandens garų pralaidumo koeficientą (įprastinio betono vandens garų varžos faktorius yra 84). Kompozito su EPS atliekos granulėmis vandens garų pralaidumą tyrė Sinica *et al.* (2008). Nustatyta, kad mažiausia vandens garų varžos faktoriaus vertė, 6, gauta esant mažiausiam – 150 kg/m³ – bandinio tankiui, didžiausia vertė, 14,8, gauta esant didžiausiam tankiui – 350 kg/m³. Tokie rezultatai gauti dėl skirtingos kompozito struktūros, mažesnio tankio, bandiniuose suminis porų tūris matricos pertvarėlėse yra didesnis, negu didesnio tankio bandiniuose.

Betonų su lengvaisiais užpildais atsparumas ugniai priklauso nuo sudedamųjų komponentų. Vienos medžiagos geriau atlaiko temperatūros poveikį (PSG), o kai kurios išvis negali atlaikyti padidintos temperatūros (EPS). Statybos produktų gaisrinis pavojingumas apibūdinamas degimo produktų temperatūra, masės netektimi, liepsnojimo trukme, išsiskiriančiu šilumos kiekiu, gaisro

plitimu ir dūmų susidarymo sparta, liepsnos plitimo greičiu. Pagal bandymų rezultatus gaminiai pagal LST EN 13501 standartą yra skirstomi į degumo klases – A1, A2, B, C, D, E ir F. Pagal dūmų susidarymą statybos produktai papildomai skirstomi į tris poklases: s1, s2, s3, o pagal degančių dalelių susidarymą – dar į tris poklases: d0, d1, d2. Kligys (2009) tyrė kompozicinę medžiagą, susidedančią iš cemento ir EPS atliekos granulių. Jis nustatė, kad 150–350 kg/m³ tankio kompozitas skirtinas B-s1, d0 degumo klasei (sunkiai degi, mažai dūmų degimo metu, nesusidaro degančių dalelių).

Cemento ir lengvųjų užpildų pagrindu gautų kompozicinių medžiagų ilgaamžiškumas priklauso nuo cemento akmens, lengvųjų (porėtų) užpildų ir kontakto tarp jų (sukibimo) savybių. Autoriai (Бужевич 1970; Mueller *et al.* 2015) pabrėžia, kad daugiausia ilgaamžiškumą lemiantis veiksnys yra cemento akmens atsparumas šalčiui ir cemento akmens adhezinių savybių pastovumas porėtų užpildų atžvilgiu. Бужевич (Бужевич 1970), atlikęs tyrimus, teigia, kad, net ir naudojant neatsparius šalčiui porėtus užpildus, bet naudojant atsparų šalčiui cemento akmenį, bendras gaminio atsparumas šalčiui nebūna mažas. Žinoma, norint pagaminti ekonomišką ir ilgaamžę konstrukciją, būtina siekti, kad visi komponentai būtų kuo atsparesni veikiantiems eksploataciniams veiksniams. Lyginant medžiagų su lengvaisiais užpildais ir su tankiaisiais užpildais atsparumą šalčiui reikėtų pažymėti, kad paprastai lengvųjų užpildų sukibimas su cemento akmeniu yra geresnis dėl užpildų grublėtos struktūros, o tai didina atsparumą šalčiui. Taip pat atsparumui šalčiui gali turėti įtakos uždaroje užpildo porose esantis oras ir mažas jų įmirkis, kurie sąlygoja mažesnę ardančiųjų veiksnių poveikį. Tačiau žinoma atvejų, kai naudojami lengvieji užpildai iš cemento tešlos išsiurbia vandenį ir nuvandeninti kontaktiniai sluoksniai tampa poringesni, o tai pablogina sukibimą, o kartu ir ilgaamžiškumą. Atsparumą šalčiui gali lemti ir poringų užpildų kilmė, pavyzdžiui, užpildai, kurie susidaro arba gaunami terminiu būdu (vulkaninės kilmės užpildai, pemza, keramzitas, stiklo granulės, granuluoti aukštakrosnių šlakai ir kt.), didina kompozicinių medžiagų atsparumą šalčiui. Būdinga ir tai, kad, siekiant padidinti medžiagų su lengvaisiais užpildais atsparumą šalčiui, reikia didinti ne tankį (kaip sunkiųjų betonų atveju), bet mažinti atvirąjį porėtumą arba didinti cemento akmens tankį (Бужевич 1970).

Medžiagos su lengvaisiais užpildais yra mažiau atsparios šalčiui, tačiau yra pakankamo atsparumo šalčiui, kad būtų naudojamos sieninėse konstrukcijose. Pakankamas atsparumas šalčiui gaunamas naudojant poringus užpildus, kurių mažas vandens įmirkis (pvz., keramzitas), taip pat porizuojant cemento akmenį. Tokių medžiagų sudėtis, atsparumas šalčiui gali būti padidinamas naudojant hidrofobizuojančias įmaišas (Комар 1988). Kaip nurodo Бужевич (1970), atitinkamai parinkus medžiagų sudėtis, cemento ir lengvųjų užpildų pagrindu atsparumas šalčiui gali siekti net iki 500 ciklų (tūrinio šaldymo ir atšildymo būdu). Praktiškai, nenaudojant PAM, pasiekama nuo 10 iki 200 ir daugiau ciklų. Tai

priklauso nuo užpildų pobūdžio. Patikimas būdas didinti atsparumą šalčiui yra V/C santykio mažinimas tam tikrose ribose ir PAM naudojimas (hidrofobizuojantys, orą įtraukiančios įmaišos). Tokių įmaišų efektyvumas pasireiškia tuo, kad jos sąlygoja tolygių ir uždarų porų susidarymą cemento akmenyje. Šios poros, blokuoja vandens migraciją ir mažina kapiliarinę įgertį (Szwabowski, Lazniewska-Piekarczyk 2009). Spiesz ir kiti tyrė lengvuosius kompozitus (tankis 1280–1490 kg/m³) cemento pagrindu su smulkiais PSG (iki 4 mm) ir įvertino jų t. y. šių kompozitų ilgaamžiškumą pagal EN 12390-9. Šis metodas tinka įvertinti betono paviršiaus erozijai t. y. atskilinėjimui. Gauti rezultatai parodė, kad visi bandiniai atsparūs šalčiui, o lyginant tarpusavyje jų atsparumą šalčiui, konstatuota, kad jis didėja dėl didesnio cemento poringumo (Spiesz *et al.* 2013). Klīgys (2009), tyręs kompozicinės medžiagos iš poringosios cemento tešlos (matricos) ir EPS atliekos savybes, nustatė, kad jas, o kartu ir atsparumą šalčiui lemia matricos sienelių kiekis bandinio tūryje ir jų storis, tuštumų, esančių tarp intarpų ir matricos, pobūdis, intarpų kiekis bandinio tūryje ir jų granulimetrinė sudėtis, V/C santykis. Tokios kompozicinės medžiagos masės nuostoliai po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų kito nuo 0,3 iki 4,8 %, o gniuždymo stiprio vertės sumažėjo nuo 4,3 iki 14,8 %.

1.6.3. Cementinių kompozitų su putstiklio ir polistireninio putplasčio užpildu eksploatacinės savybės

Lengvasis kompozitas, sukurtas naudojant PSG, yra vienas iš naujesnių kompozito tipų. Autoriai Dhir *et al.* (2005) nustatė, kad PSG gali būti naudojamas legvasvorei betoninei nelaikančiajai ir pusiau laikančiajai konstrukcijai. PSG užpildas atrodo gana perspektyvi medžiaga, lyginant jį su kai kurių kitų rūšių lengvaisiais užpildais. Jis turi sąlyginai didelį mechaninį stiprumą, mažą vandens įgertį, atsparus šalčiui bei cheminiams poveikiams. Atvira arba uždara užpildo porų struktūra gali būti pasiekta priklausomai nuo degimo proceso temperatūros ir dedamų priedų (Kose, Bayer 1982; Ducman *et al.* 2002).

Lengvojo kompozito, gaminamo cementinę matricą sumaišius su PSG, tankis kinta nuo 187 iki 1600 kg/m³ (Macedo 2011; Bumanis *et al.* 2013). Dėl mažo PSG tankio šios medžiagos gniuždymo stipris taip pat yra mažas. Kai užpildų tankis mažesnis nei 1000 kg/m³, lengvųjų užpildų betono tamprumo modulis ir gniuždymo stipris priklauso nuo panaudotų užpildų frakcijos (Nemes 2006). Gamintojai deklaruoja, kad PSG gniuždymo stipris yra 0,45–0,55 MPa. Sumaišius PSG su cementine matrica, gauto kompozito gniuždymo stipris gali būti nedidelis dėl pačių PSG nedidelio stiprio. Lengvųjų užpildų išorinio kevalo storis ir porų makrostruktūra lemia užpildo stiprumą (Ke *et al.* 2009). Optimalus PSG užpildo skirtingų frakcijų ir tam tikro stiprumo cementinės matricos kiekis gali būti nustatomas atsižvelgiant į tai, kokio tankio ir gniuždymo stiprio lengvą-

jį betoną norima gauti (Nemes 2006). Silpniausias lengvojo betono komponentas yra ne cementinė matrica ir ne kontakto zona tarp šios matricos ir užpildų, o patys lengvieji užpildai. Taigi mechaninės lengvojo betono savybės priklauso ne tik nuo cementinės matricos kokybės, bet ir nuo naudojamų užpildų savybių ir šių užpildų kiekio (Chi *et al.* 2003). Jeigu norime padidinti kompozito stiprį, turime pakeisti PSG kiekį lengvasvoriame betono mišinyje, didinti cemento arba cementinę matricą modifikuojančių priedų kiekį. Tokie veiksniai turi įtakos lengvojo betono šilumos laidumui. Aptariant tyrimų rezultatus nurodoma, kad, didinant PSG kiekį sudėtyje nuo 300 iki 400 kg/m³, betono tankis sumažėjo nuo 658 iki 561 kg/m³, šilumos laidumo koeficientas nuo 0,163 iki 0,140 W/(m·K), gniuždymo stipris nuo 5,8 iki 4,1 MPa (Bumanis *et al.* 2013).

PSG stambių ir smulkių granuliu poveikį mechaninėms savybėms ir jų tinkamo kiekio panaudojimo intervalą nustatė Limbachiya *et al.* (2012). Natūralus betono užpildas (žvyras ir smėlis) buvo keičiamas stambiomis (30, 40, 50, 60 ir 100 %) ir smulkiomis (5, 10 ir 15%) PSG. Rezultatai parodė, kad tinkamiausias stambių PSG kiekis yra nuo 30 iki 40 %. Keičiant natūralų betono užpildą 30 % stambiomis ir 5 % smulkiomis PSG, gniuždymo stipris po 3 kietėjimo parų pasiekia tokį pat gniuždymo stiprį, kaip naudojant 70 % stambių PSG po 28 kietėjimo parų. Khatib *et al.* (2012) mokslininkai nustatė, kad, keičiant stambų betono užpildą (žvyrą) 25, 50, 75 ir 100 % PSG granuliu užpildu, betono tankis ir gniuždymo stipris mažėjo didinant PSG užpildo procentinį kiekį. Kai stambusis betono užpildas visiškai, t. y. 100 %, buvo pakeistas PSG užpildu, tankio vertė sumažėjo nuo 2328 iki 1401 kg/m³, o gniuždymo stiprio vertė priklausomai nuo panaudoto PSG užpildo kiekio sumažėjo nuo 30,67 iki 14,97 MPa (nuo 20 iki 50 %). Atlikus lengvojo betono su PSG lengvuju užpildu mikrostruktūros tyrimus po 28 parų kietėjimo pastebėta susidariusių spragų (oro tarpų) kontakto zonoje tarp PSG ir cemento akmens. Tai gali būti siejama su šarminės silicio reakcijos pradžia. Tokių medžiagų naudojimas dėl savo didelio plėtimosi ir gniuždymo stiprio sumažėjimo yra ribojamas. Vienas būdų apriboti šarminę silicio reakciją yra naudoti pucolaninius priedus lengvojo betono mišinyje, taip pat tinkamo tipo cemento, turinčio mažai Na₂O, naudojimas gali paveikti šarminę silicio reakciją ir apriboti kompozito plėtimąsi ir gniuždymo stiprio sumažėjimą (Bumanis *et al.* 2013).

Liu *et al.* (2010) mokslininkai sukūrė lengvąjį betoną, labai atsparų vandens ir chloridų įgėriui. Cemento kiekis siekė 500 kg/m³, o tankis – 1400 kg/m³, naudojant keramzito ir PSG kaip legvąjį betono užpildą. Lengvojo betono gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų buvo 24 MPa. Jasaitienė *et al.* (2010) nustatė, kad vandens įmirkis, naudojant PSG, kaip lengvojo betono užpildą, du kartus didesnis nei naudojant keramzito granules (naudojant PSG – 19,66 %, keramzito – 9,04 % po 1 h mirkymo). Toks skirtumas atsirado dėl mažo PSG tankio ir padidėjusio atvirų porų skaičiaus. Kiti mokslininkai nustatė lengvojo betono su

0/5 mm frakcijos PSG įmirkį po 3 parų. Naudojamų granulių kiekis buvo nuo 300 iki 500 kg/m³, kompozito įmirkis kito nuo 30 iki 35 % (Bumanis *et al.* 2013).

EPS granulės taip pat naudojamos kaip potencialus priedas lengviesiems betonams. EPS granulės ir EPS atliekos granulės taip pat buvo plačiai naudojamos įvairiais tikslais (Sinica *et al.* 2008; Demirboga *et al.* 2003). Ravindrayah nustatė, kad į gryną betono mišinį įdėjus 10, 20 ir 30 % EPS granulių, nuo mišinio masės, betono tankis sumažėjo nuo 2455 kg/m³ iki 2330, 2210 ir 2080 kg/m³, atitinkamai panaudoto užpildo kiekiui. Taip pat buvo nustatyta, kad toks polistireno užpildų betonas pasižymi didesniu atsparumu cheminiams poveikiams ir šalčiui (Ravindrarajah 1999). Laukaitis ir kitų mokslininkų atliktais tyrimais buvo nustatyta, kad perdirbtos EPS atliekos, kaip ir pagamintos EPS granulės, gali būti naudojamos kaip užpildas termoizoliaciniais lengviesiems cemento kompozitams kurti. Tokių kompozitų tankis yra 150–170 kg/m³, šilumos laidumo koeficientas – 0,06–0,064 W/(m·K), gniuždymo stipris – 0,25–0,28 MPa (Laukaitis *et al.* 2005). Panašių kompozitų, naudojant EPS granules, šilumos laidumą tyrė Sinica *et al.* (2008). Autoriai nustatė, kad kompozito, kurio tankis svyruoja nuo 150 iki 350 kg/m³, gniuždymo stipris yra 0,09–0,42 MPa, lenkimo stipris 0,09–0,39 MPa, šilumos laidumas proporcingai medžiagos kiekiui kito nuo 0,048 iki 0,095 W/(m·K). Gipso blokus, kurių sudėtyje buvo 50–70 % trupinto EPS, sukūrė Sayil ir Gürdal (1999). Tokių kompozitų tankis sumažėjo nuo 690 iki 208 kg/m³, o šilumos laidumo koeficientas nuo 0,240 iki 0,183 W/(m·K).

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikus literatūros analizę matyti, kad kaip pucolaninis priedas MK savo efektyvumu ir savybėmis yra aktyvesnis priedas nei SiO₂ mikrodulkės, lakieji pelenai ar malto stiklo milteliai. MK turi pranašumą prieš kitus pucolaninius priedus dėl savo smulkumo, poveikio cemento teslos bei cemento akmens fizikinėms-mechaninėms savybėms ir ekologiškumo.
2. Mokslinėje literatūroje apie metakaolininės atliekos panaudojimą betonams ar skiediniams nerašoma.
3. Mokslinėje literatūroje konstatuojama, kad cementinės matricos savybėms gerinti naudojamos orą įtraukiančios įmaišos, plastifikuojančios įmaišos ir pucolaniniai priedai. Pastebėta, kad orą įtraukiančios, plastifikuojančios įmaišos ir pucolaniniai priedai buvo naudojami atskirai, o apie bendrą jų naudojimą literatūroje nerašoma.

4. PSG pritaikymas ir jų poveikis lengvųjų kompozitų struktūrai ir eksploatacinėms savybėms nėra pakankamas, nors panaudojimo potencialas, turint omenyje stiklo atliekų kiekį ir jų nekenksmingumą, yra didžiulis. Esamų kompozitų tankiai ir šilumos laidumas yra pakankamai dideli. Norint gauti mažesnės vertės tankį, reikia kurti lengvasvorį kompozitą, kurio struktūroje tuštumos būtų pripildytos medžiagos (pavyzdžiui EPS), kurios nedidelis šilumos laidumas. Informacijos apie PSG granulių poveikį lengviesiems kompozitams, o apie kompozitų su PSG ir EPS mišiniu techninėje literatūroje nėra šoma.

Užsibrėžtam tikslui pasiekti, darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti modifikuojančių priedų ir įmaišų poveikį cemento tešlos hidratacijos kinetikai bei gautos matricos struktūrai ir fizikinėms bei mechaninėms savybėms.
2. Sukurti termoizoliacinį kompozitą iš modifikuotos cementinės matricos ir lengvųjų užpildų bei ištirti jų poveikį termoizoliacinio kompozito struktūrai ir fizikinėms bei mechaninėms savybėms.
3. Išaiškinti cementinę matricą modifikuojančių priedų veikimo cemento tešloje principą.

Termoizoliaciniam cementiniam kompozitui naudotų medžiagų aprašymas ir tyrimų metodikos

Šiame skyriuje aprašomos tiriamajame darbe naudotos medžiagos, jų savybės, naudota įranga, cementinės matricos ir termoizoliacinio kompozito formavimo sudėtys, tankio, makro- ir mikrostruktūros tyrimų, gniuždymo ir lenkimo stiprio, šilumos laidumo, pralaidumo vandens garams, džiūstamojo susitraukimo, kapiliarinės įgerties koeficiento, vandens įmirkio, atsparumo ugniai ir ilgalaikiškumo nustatymo metodikos.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Šeputytė-Jucikė, Sinica 2016; Šeputytė-Jucikė *et al.* 2014; Pundienė *et al.* 2014; Šeputytė, Sinica 2013) ir įregistruotas vienas patentas Lietuvos patentų biure (Sinica *et al.* 2015).

2.1. Naudotos medžiagos

Darbe naudotos šios medžiagos:

- rišamoji medžiaga – CEM I 42,5R markės portlandcementis (Lietuva);
- metakaolininė atlieka (Druskininkai, Lietuva);
- orą įtraukianti įmaiša „Ufapore TCO“ (Norvegija);
- superplastiklis – „Castament FS-40“ (Vokietija);
- užpildai – putstiklio granulės (PSG) ir trupintos polistireninio putplasčio (EPS) atliekos (Lietuva).

2.1.1. Portlandcementis

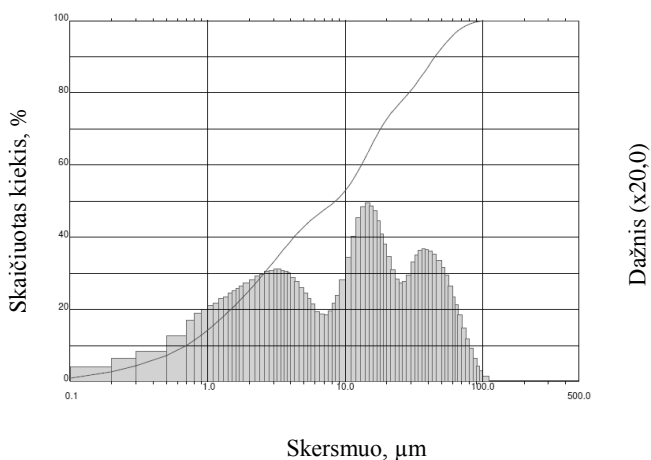
Kaip rišamoji medžiaga buvo naudotas AB „Akmenės cementas“ CEM I 42,5R portlandcementis (PC). Jis atitinka EN 197-1 reikalavimus. Specifinis savitasis paviršius nustatytas vadovaujantis Bleino metodika – $356 \text{ m}^2/\text{kg}$, piltinis PC tankis 1150 kg/m^3 . Darbe nustatyta cheminė portlandcemenčio sudėtis pagal EN 196-2 reikalavimus ir pateikta 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Portlandcemenčio cheminė sudėtis

Table 2.1. Chemical composition of Portland cement

PC cheminė sudėtis, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Kitos
19,23	4,91	3,50	62,46	3,19	0,94	0,12	3,10	2,55

Taip pat nustatyta mineralinė PC sudėtis pagal Bogue (1955) metodiką (C₃S – 63,70 %, C₂S – 7,68 %, C₃A – 6,34 %, C₄AF – 12,58 %). Dalelių pasiskirstymas pagal dydį, kuris pateiktas 2.1 paveiksle, buvo atliktas „CILAS 1090“ prietaisu. Nustatyta kad PC dalelių dydis yra nuo 1 iki 100 μm , 50 % PC sudarė 15–30 μm dydžio dalelės.



2.1 pav. Portlandcemenčio dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 2.1. The distribution of Portland cement particles by size

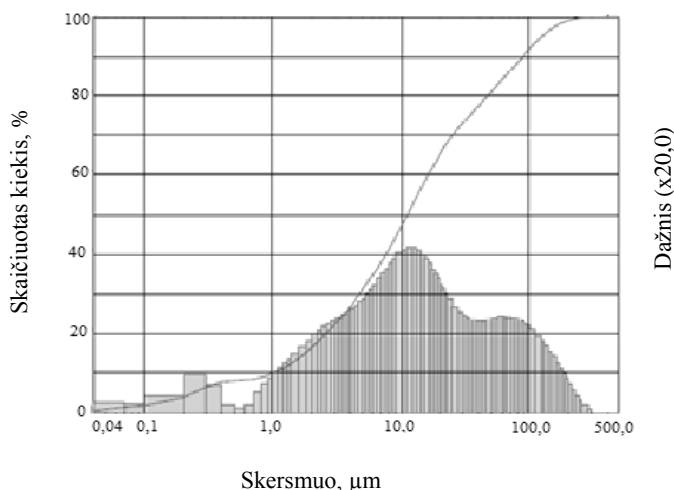
2.1.2. Metakaolininė atlieka

Dalis (10 %) PC buvo keičiama metakaolinine atlieka (MKA). Tai UAB „Stikloporo“ putstiklio granulių gamybos technologinė atlieka, kuri susidaro granulių gamybos procese kaolino miltus kaitinant 820–850 °C temperatūroje. MKA piltinis tankis – 480 kg/m³, specifinis savitasis paviršius – 897 m²/kg. Darbe nustatyta cheminė MKA sudėtis, pateikta 2.2 lentelėje. Iš lentelės matyti, kad pagrindiniai cheminiai elementai sudarantys MKA yra SiO₂ ir Al₂O₃. Dalelių pasiskirstymas pagal dydį pateiktas 2.2 paveiksle (atliktas „CILAS 1090“ prietaisu), 40 % MKA miltelių sudarė 8–15 µm dydžio dalelės. Iš pateiktos MKA rentgenogramos (2.3 pav.) matyti, kad intensyviausios MKA sudarančios smailės yra kaolinito ir kvarco. MKA mikrostruktūros vaizde parodytame 2.4 paveiksle, galime matyti rentgenogramoje nustatyto kaolinito plokšteles.

2.2 lentelė. Metakaolininės atliekos cheminė sudėtis

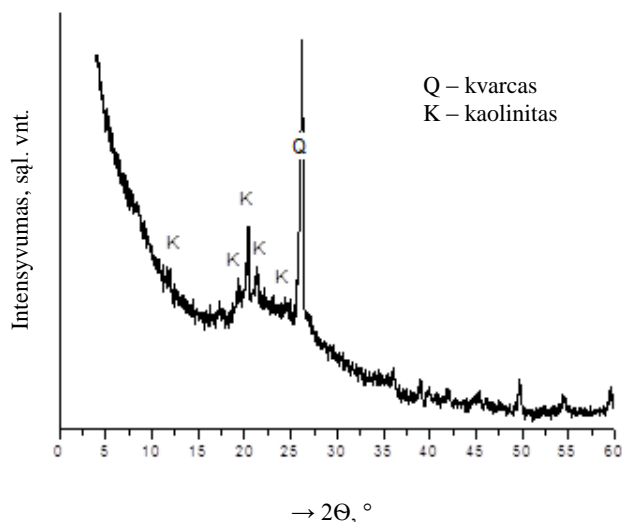
Table 2.2. Chemical composition of metakaolinic waste

MKA cheminė sudėtis, %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O+ Na ₂ O	TiO ₂	Kitos
46,1	37,2	1,10	0,20	0,20	0,70	0,70	13,8



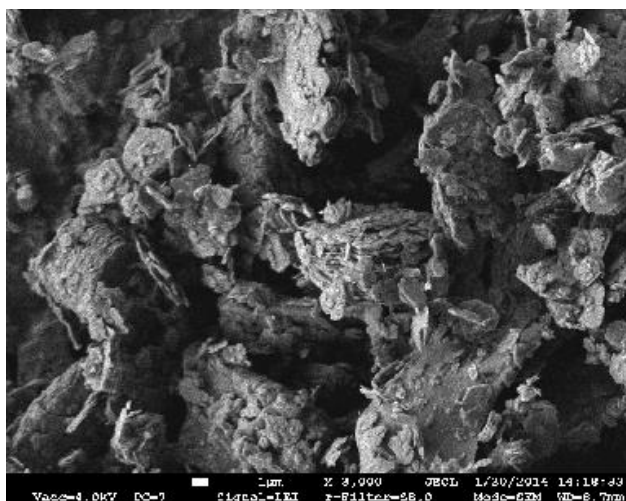
2.2 pav. Metakaolininės atliekos dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 2.2. The distribution of metakaolinic waste particles by size



2.3 pav. Metakaolininės atliekos rentgenograma

Fig. 2.3. X-ray pattern of metakaolinic waste



2.4 pav. Metakaolininės atliekos dalelių vaizdas (didinimas $\times 3\,000$)

Fig. 2.4. View of the metakaolinic waste (magnification $\times 3\,000$)

2.1.3. Plastifikuojančios ir orą įtraukiančios įmaišos

Cementinės matricos mišiniui stabilizuoti buvo naudojamos dvi modifikuojančios įmaišos, t. y. superplastiklis (SPL) – „Castament FS-40“ ir orą įtraukianti įmaiša (OII) – „UFAPORE TCO“.

OII tai natrio alkenų sulfonato pagrindu pagaminta įmaiša. Jos paskirtis yra porizuoti – užtikrinti smulkių porų susidarymą cementinėje matricoje ir hidrofilizuoti trupintas polistireninio putplasčio atliekas. Gamintojo rekomenduotas OII kiekis cementinėje matricoje – 0,01–0,06 % nuo rišamosios medžiagos masės. Atlikti preiliminarūs tyrimai parodė, kad efektyviausias OII kiekis, kuris bus naudojamas bandymams, lygus 0,05 %.

„Castament FS-40“ yra naujos kartos superplastifikatorius (SPL), pagamintas polikarboksilatinio eterio pagrindu. SPL efektyviai mažina portlandcemenčio matricos klampą, o pagal gamintojo BASF rekomendacijas turi būti naudojama nuo 0,05 iki 0,5 % nuo rišamosios medžiagos masės. Atlikti preliminarūs tyrimai parodė, kad efektyviausias kiekis, kuris bus naudojamas bandymams yra 0,5 %.

Pagrindinės OII ir SPL savybės nurodytos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Pagrindinės orą įtraukiančių ir plastifikuojančių įmaišų savybės

Table 2.3. Main properties of are air entraining and plasticizer admixtures

Įmaiša	Savybės			
	pH	Elektros laidumas vandens tirpale, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Pavidalas	Aktyvios medžiagos kiekis, %
OII	8,0	–	Baltos spalvos milteliai	94,0
SPL	8,4	250	Geltonos spalvos milteliai	–

2.1.4. Lengvieji užpildai

Termoizoliacinio kompozito bandiniams formuoti kaip užpildas naudotos trijų skirtingų frakcijų (8–16, 4–8 ir 0–2 mm) putstikio granulės (PSG), pagamintos UAB „Stikloporas“ gamykloje ir UAB „Virginijus ir Co“ pagamintos trupintos 0–2 mm dydžio polistireninio putplasčio atliekos (trupinta EPS atlieka). Jų piltinis tankis nustatytas pagal LST EN 1097-6 reikalavimus. PSG atsparumas šalčiui, vandens įgeriamumas, atsparumas trupinimui nustatyti pagal LST EN 13055-1 reikalavimus. Lengvųjų užpildų PSG ir trupintos EPS atliekos šilumos laidumas nustatytas naudojant prietaisą „λ–meter EP500“ pagal LST EN 12664 reikalavimus. Užpildų mikrostruktūros tyrimai atlikti naudojant

lauko emisijos skenuojantįjį elektroninį mikroskopą su rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometru „JEOL 7600F“.

2.2. Cementinės matricos ir termoizoliacinio kompozito formavimo mišinių paruošimas bei bandinių formavimas

2.2.1. Cementinės matricos bandinių formavimas

Cemento tešlai ruošti buvo naudota rišamoji medžiaga PC, pucolaninis priedas MKA, modifikuojančios įmaišos OII ir SPL bei (20 ± 5) °C temperatūros vanduo. Norint įvertinti naudojamų priedų MKA, OII ir SPL poveikį cementinės matricos savybėms, buvo parinktos aštuonios sudėtys (2.4 lentelė). Vandens ir rišamosios medžiagos santykio kiekis (V/R) nustatytas atsižvelgiant į literatūroje pateiktą informaciją ir cemento tešlos technologiškumą, t. y. vandens kiekis mišinyje eksperimentiniu būdu buvo didinamas tol, kol cemento tešlos sklidumas siekė (150 ± 5) mm (Donson 1990).

2.4 lentelė. Cementinės matricos formavimo mišinių sudėtys

Table 2.4. Compositions of formative mixtures out of cement paste

Sudėties žymėjimas	Komponentų kiekis, masės %				V/C*	V/R**
	PC	MKA	Įmaišų kiekis nuo PC masės, %			
			SPL	OII		
1	100	–	–	–	0,24	–
2	100	–	–	0,05	0,23	–
3	100	–	0,5	–	0,15	–
4	100	–	0,5	0,05	0,15	–
5	90	10	–	–	0,28	0,25
6	90	10	–	0,05	0,27	0,24
7	90	10	0,5	–	0,18	0,16
8	90	10	0,5	0,05	0,17	0,15

*) vandens ir PC santykis

**) vandens ir rišamosios medžiagos, sudarytos iš PC ir MKA, santykis

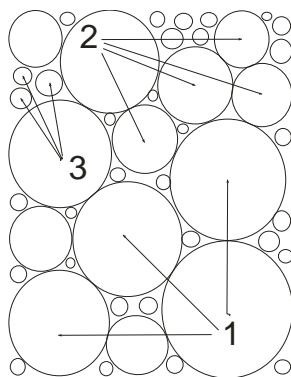
PC, MKA ir SPL buvo maišomi laboratorinėje „Varimixer bear“ maišyklėje. Pirmiausia maišyklėje 3 min buvo maišomi sausi komponentai (PC, MKA, SPL), vėliau šios medžiagos 5 min buvo maišomos su vandeniu, o galiausiai, į mišinį įdėjus OII, mišinys buvo maišomas pirmu atveju 2, antru 5, trečiu 10 min. Maišyklės greitis visų maišymų metu siekė 60 aps./min

Cemento teslos hidratacijai stebėti paruošto mišinio buvo pripildyta kubo tipo forma, kurios matmenys – $(100 \times 100 \times 100)$ mm. Cemento akmens savybėms nustatyti buvo ruošiami stačiakampio formos bandiniai, kurių matmenys – $(160 \times 40 \times 40)$ mm. Supiltas į formas cemento mišinys 1 min buvo tankinamas naudojant vibrostalą. Pripildytos cemento teslos formos buvo 2 paras laikomos uždengtos plėvele, o tada bandiniai išformuojami ir dar 26 paras laikomi (20 ± 5) °C temperatūros vandenyje.

2.2.2. Termoizoliacinio kompozito bandinių formavimas

Prenkant kompozitų formavimo sudėtis buvo siekiama dviejų tikslų. Pirmą – parinkti optimalią užpildo granulimetrinę sudėtį, užpildo kiekį ir tipą. Antrą – parinkti rišamosios medžiagos kiekį.

Efektyviausia granulimetrinė termoizoliacinio kompozito sudėtis parinkta atsižvelgiant į norimus pasiekti tikslus, t. y. kad būtų kuo mažesnis kompozito šilumos laidumas ir pakankamas gniuždymo stipris. 1 l talpos stiklinis indas, stengiantis gauti kuo vienalytiškesnę kompozito struktūrą, buvo pripildytas stambių 8–16 mm frakcijos PSG (atsižvelgiant į tai, kad jų šilumos laidumo koeficientas mažiausias), o tarpai pripildyti 4–8 mm ir 0–2 mm frakcijos PSG (2.5 pav.).



2.5 pav. Užpildo granulių pasiskirstymo bandinyje schema:

1 – stambios; 2 – vidutinės; 3 – smulkios

Fig. 2.5. Aggregate article distribution scheme in sample:

1 – large; 2 – medium; 3 – small

2.5 paveiksle pavaizduotame derinyje viršutiniame sluoksnyje esančios granulės spaudžia apatinį sluoksnį per tarpinę grandį, t. y. viršutinė granulė remiasi į kelias apatiniame sluoksnyje esančias granules. Taip granulių sąlyčio zonoje veikiančios jėgos pasiskirsto į kelias granulių kontakto zonas ir gali atlaikyti ne-suirsdamos kur kas didesnes apkrovas, nei vienodo dydžio stambios granulės, o dėl esančio didžiausio stambių PSG kiekio galima pasiekti mažą šilumos laidumo koeficientą. Tačiau, siekiant dar labiau pagerinti šilumines kompozito savybes, PSG smulkiausia frakcija buvo keičiama trupintos EPS atliekos lengvuju užpildu, kuris pasižymėjo mažu tankiu ir nedideliu šilumos laidumo koeficientu. Tolesniuose eksperimentuose, keičiant vidutinių ir smulkių granulių kiekius, pagal gautas eksperimentines kompozitų šilumos laidumo ir gniuždymo vertes pasirinktas užpildų santykis. Šis santykis pateiktas 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Termoizoliacinio kompozito formavimo mišinių sudėtys

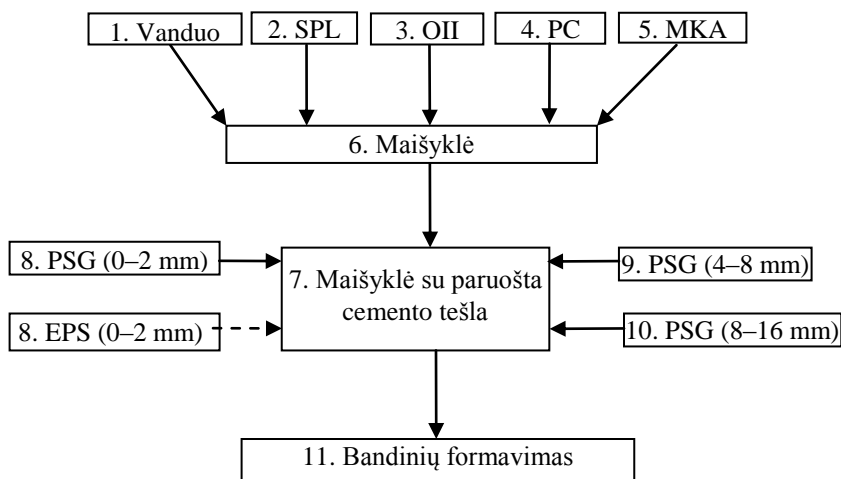
Table 2.5. Compositions of formative mixtures of thermal insulation composite

Naudotos medžiagos, mato vienetas	Kompozito sudėties žymuo					
	1K	2K	3K	4K	5K	6K
PC, kg/m ³	70	100	130	70	100	130
MKA, kg/m ³	7	10	13	7	10	13
SPL, kg/m ³	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65
OIL, kg/m ³	0,0175	0,0250	0,0325	0,0175	0,0250	0,0325
PSG (8–16 mm), kg/m ³	72	72	72	72	72	72
PSG (4–8 mm), kg/m ³	28	28	28	28	28	28
PSG (0–2 mm), kg/m ³	58	58	58	–	–	–
Trupinta EPS atlieka (0–2 mm), kg/m ³	–	–	–	5	5	5
Vanduo, kg/m ³	39	42	44	46	53	60

Rišklio kiekio ir užpildų tipo poveikiui, termoizoliacinio kompozito struktūrai ir savybėms nustatyti buvo parinktos šešios kompozitų sudėtys su trimis skirtingais rišamosios medžiagos kiekiais. Kompozito formavimo mišinių sudėtys pateiktos 2.5 lentelėje. Ruošiant formavimo mišinius, visos kompozito sudedamosios dalys buvo maišomos vertikalia maišykle, apvaliame 20 l talpos plastikiniame inde. Maišyklės greitis visų maišymų metu buvo 125 aps./min.

Termoizoliacinio kompozito bandinių gamybos proceso technologinė schema pateikta 2.6 paveiksle. Termoizoliacinio kompozito bandinių formavimas vyko tokia tvarka: pirmiausia buvo paruošiama cemento tešla, t. y. PC ir OIL,

SPL, MKA priedai sumaišyti su vandeniu ir maišomi 5 min. Tada į modifikuotos cemento tešlos masę supilamas reikiamas kiekis smulčiausios frakcijos granulių (vienu atveju – PSG, kitu – trupintos EPS atliekos), jas sumaišius, dedamos vidutinės frakcijos PSG ir didžiausios frakcijos PSG, sudedamosios dalys maišomos, kol gaunama vienytybė formavimo masė. Sumaišyta kompozito masė supilama į formas ir sutankinama medine lentele, kad granulės būtų suartinamos tarpusavyje, nepažeidžiant jų struktūros, ir kad neišs sluoksniuodama kompozito masė galėtų tolygiai pasiskirstyti naudojamose formose. Suformuoti šešių kompozito sudėčių bandiniai formose uždengiami polietileno plėvele ir dvi dienas laikomi (20 ± 5) °C temperatūros aplinkoje. Po dviejų dienų bandiniai išformuojami, uždengiami polietileno plėvele ir laikomi 26 paras (20 ± 5) °C temperatūroje.



2.6 pav. Termoizoliacinio kompozito gamybos technologinė schema

Fig. 2.6. Technological scheme for thermal insulation composite

2.3. Tyrimų metodikos

2.3.1. Cemento tešlos ir cemento akmenų tyrimo metodai

Vandens kiekis cemento mišinyje buvo nustatomas atliekant sklidumo bandymą. Tam buvo naudotas kratymo stalelis. Maišyklėje išmaišyta cemento tešla dviem sluoksniais, kiekvieną jų 10 kartų sutankinant metaliniu 2 mm skersmens strypeliu, sukręsta į nupjauto kūgio formą, kuri buvo padėta kratymo stalelio

stiklinio disko centre. Vėliau nupjauta kūgio forma nuimama ir ant stiklo paviršiaus išsiliejęs mišinys 15 kartų sukratomas pastoviu dažniu 1 aps./s.

Porizuotos cemento tešlos tankiui po 2, 5 ir 10 minučių maišymo nustatyti naudotas apvalus metalinis 1,0 l talpos indas. Cemento tešlos tankis ρ_{ct} nustatytas sveriant tuščią, o paskui pripildytą cemento tešlos indą ir apskaičiuotas pagal (2.1) formulę:

$$\rho_{ct} = \frac{m_F - m_E}{V} \cdot 10^6, \text{ kg/m}^3; \quad (2.1)$$

čia m_F – pripildyto porizuotos cemento tešlos indo masė, g; m_E – tuščio indo masė, g; V – indo tūris, mm^3 .

Egzoterminio proceso temperatūra cemento tešloje buvo nustatyta pagal „Alcoa“ firmos sukurtą metodiką. 1,3 kg sveriantis tešlos bandinys dedamas į (100×100×100) mm dydžio formą. Formuojant į bandinį įstatoma plastikiniame vamzdyje esanti T tipo termopora ir formavimo mišinys su forma tuoj pat dedamas į metalinę dėžę, kur yra izoliuojamas 50 mm storio polistireno putplasčio termoizoliacine medžiaga. Kol vyksta šilumos išsiskyrimas bandinyje, temperatūros kitimo eiga kas 1 min nepertraukiamai fiksuojama. Egzoterminis procesas buvo nustatomas (20±1) °C temperatūros aplinkoje.

Cemento akmens bandinių tankis ρ_{ca} buvo nustatytas pagal LST EN 1015-10. Pirmiausia bandiniai buvo maišomi 2, 5 ir 10 min. Tankis buvo nustatomas prieš tai išdžiovinus bandinius (105±5) °C temperatūroje iki pastovios masės, ir apskaičiuotas pagal (2.2) formulę:

$$\rho_{ca} = \frac{m}{V} \cdot 10^6, \text{ kg/m}^3; \quad (2.2)$$

čia m – išdžiovinoto cemento akmens bandinio masė, g; V – cemento akmens bandinio tūris, mm^3 .

Cemento akmens makrostruktūra. Bandinių paviršiaus analizei tirti, buvo parenkamos charakteringos vietos ir stebimos optiniu mikroskopu „Motic“, kuris turi skaitmeninę kamerą „Pixera PVC 100C“, sujungtą su kompiuteriu (didinimas iki 100 kartų).

Cemento akmens mikrostruktūros tyrimai atlikti naudojant lauko emisijos skenuojantįjį elektroninį mikroskopą su rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometru SEM JEOL JSM-7600F, kurio skiriamoji geba yra 1,5 nm, didinimas nuo 25 iki 1 000 000 kartų, o bandymo metu naudota įtampa 0,5 kV. Naudojami bandiniai specialiomis dangomis nebuvo dengti.

Kokie junginiai susidaro cemento akmenyje cemento mineralų hidratacijos metu, nustatyta atlikus rentgenostruktūrinius tyrimus. Cemento akmuo buvo su-smulkintas mechaniškai iki 10 μm dydžio. Tyrimai atlikti difraktometru

DRON-7, kurio antikatodas – varinis, filtras – nikelinis, anodo įtampa – 30 kV, anodo srovė – 12 mA, goniometro plyšeliai – 0,5 mm, 1,0 mm ir 1,5 mm. Smailems iššifruoti buvo naudojama ICDD duomenų bazė.

Cemento akmens ultragarso impulso sklidimo greitis. Cemento akmens struktūros susidarymo tyrimas atliktas ultragarso impulso sklidimo greičio (UIG) matavimo metodu. Ultragarso sklidimo trukmė (160×40×40) mm bandiniuose nustatyta prietaisu „Pundit 7“. Ultragarso signalas buvo leidžiamas išilgai formavimo krypties. Ultragarso sklidimo greitis apskaičiuotas pagal (2.3) formulę:

$$V_{UIG} = \frac{L}{T}, \text{ m/s;} \quad (2.3)$$

čia L – bandinio ilgis, m; T – signalo sklidimo laikas, s.

Cemento akmens gniuždymo ir lenkimo stipris nustatytas pagal LST EN 1015-11. Cemento akmens gniuždymo ir lenkimo stipriai nustatyti hidrauliniu presu ALPHA3-3000 S.

Lenkimui bandyta po tris (160×40×40) mm dydžio kiekvienos sudėties bandinius. Hidraulinio preso apkrovos greitis bandymo metu – 14 N/s. Lenkimo stipris f_{cl} buvo apskaičiuojamas pagal (2.4) lygtį:

$$f_{cl} = \frac{1,5Fl}{bh^2}, \text{ MPa;} \quad (2.4)$$

čia F – didžiausia lenkimo apkrova, N; l – atstumas tarp atramų, mm; b – bandinio plotis, mm; h – bandinio aukštis, mm.

Gniuždymo stipriui nustatyti bandyta po šešias perlaužtas kiekvienos sudėties prizmių puseles tarp specialių plokštelių, kurių gniuždymo plotas $S = 25 \text{ cm}^2$. Hidraulinio preso apkrovos greitis bandymo metu – 10 N/s. Gniuždymo stipris f_{cg} buvo apskaičiuotas pagal (2.5) lygtį:

$$f_{cg} = \frac{F}{A}, \text{ MPa;} \quad (2.5)$$

čia F – didžiausia gniuždymo apkrova, N; A – bandinio skerspjūvio plotas, mm^2 .

2.3.2. Termoizoliacinio kompozito bandinių tyrimo metodai

Bandinių tankis ρ buvo nustatytas pagal LST EN 1602. Bandyta po penkis (100×100×100) mm dydžio bandinius.

Termoizoliacinio kompozito bandinių šilumos laidumo koeficientas λ_{10} nustatytas naudojant „λ-Meter EP-500“ (Vokietija) kompiuterizuotą įrenginį pagal

LST EN 12664 (2.7 pav.). Įrenginio matavimo ribos yra nuo 0,005 iki 0,500 W/(m·K), matavimų tikslumas 1 %. Bandinio matmenys (500×500×100) mm, bandinio paviršių temperatūrų skirtumas 10 °C, vidutinė bandymo temperatūra 10 °C. Bandyta po tris kiekvienos sudėties termoizoliacinio kompozito bandinius, bandiniai prieš bandymą džiovinti (70±2) °C temperatūroje iki pastovios masės. Bandinių paviršiai prieš bandant buvo šlifuojami į abrazyvinį diską.



2.7 pav. Termoizoliacinio kompozito šilumos laidumo koeficiento nustatymo bendras vaizdas

Fig. 2.7. General view of thermal conductivity test of thermal insulation composite

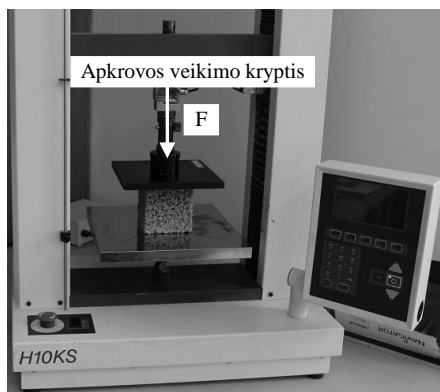
Gniuždymo stipris σ_m nustatytas pagal LST EN 826. Bandyta po penkis (100×100×100) mm dydžio kiekvienos sudėties termoizoliacinio kompozito bandinius. Gniuždymo stipris nustatytas kompiuterizuota įranga „Hounsfield-H10KS“, naudojant programą „Qmat Professional“. Įrenginio apkrovos greitis bandymo metu – 10 mm/min. Gniuždymo stipris buvo nustatomas po 3, 7, 14 ir 28 parų kietėjimo (2.8 pav.).

LST EN 826 standarte nurodyta, kad jei didžiausia įtempio vertė pasiekiamą, esant santykinę bandinio deformacijai mažesnei negu 10 %, tai didžiausia įtempio vertė yra imama kaip gniuždymo stipris.

Gniuždymo stipris σ_m apskaičiuojamas pagal (2.6) formulę:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A}, \text{ MPa}; \quad (2.6)$$

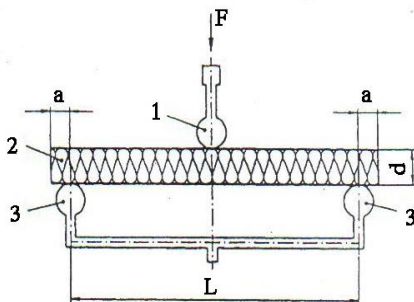
čia F_m – didžiausia gniuždymo apkrova, N; A – bandinio skerspjūvio plotas, mm².



2.8 pav. Termoizoliacinio kompozito gniuždymo bandymo bendras vaizdas

Fig. 2.8. General view of compressive strength test of thermal insulation composite

Lenkimo stipris σ_b nustatytas pagal LST EN 12089 (2.9 pav.). Lenkimo stipris nustatytas taip pat naudojama kompiuterizuota įranga „Hounsfield-H10KS“ su programa „Qmat Professional“. Bandyta po tris (300×150×50) mm dydžio kiekvienos sudėties termoizoliacinio kompozito bandinius. Bandymas atliktas pagal LST EN 12089 B metodą. Apkrova bandymo metu buvo statmena bandinio formavimo paviršiui. Apkrovai paskirstyti naudotos metalinės plokštelės, kurių matmenys (160×30) mm.



2.9 pav. Termoizoliacinio kompozito lenkimo bandymo schema:

1 – lenkiantysis antgalis; 2 – bandinys; 3 – atramos

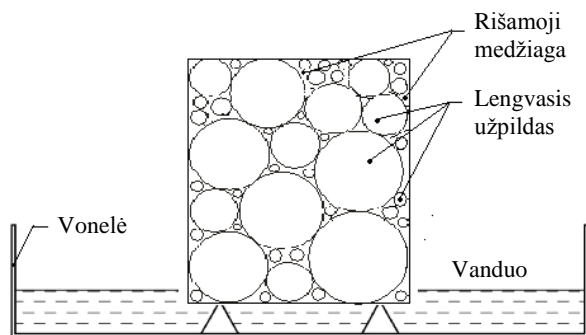
Fig. 2.9. Scheme of bending strength test of thermal insulation composite:

1 – bending tip; 2 – specimen; 3 – supports

Bandinių pralaidumas vandens garams nustatytas pagal LST EN 12086. Kadangi naujai sukurta medžiaga yra higroskopiška, vandens garų pralaidumas

buvo nustatomas esant dviejopoms klimato sąlygoms – sausomis (23°C temperatūra ir 0/50 % santykinė drėgmė) ir drėgnomis (23°C temperatūra ir 50/93 % santykinė drėgmė). Bandyta po penkis ($100\times100\times100$) mm dydžio kiekvienos sudėties bandinius. Vidutinis oro slėgis bandymo metu buvo 1007 hPa. Vandens garų srauto tekėjimo kryptis buvo statmena bandinių formavimo paviršiui.

Kapiliarinės įgerties koeficientas $c_{w,s}$ nustatytas pagal LST EN 772-11. Bandyta po šešis ($100\times100\times100$) mm dydžio kiekvienos sudėties bandinius. Kapiliarinės įgerties koeficientui nustatyti bandiniai buvo sudėti ant atraminio 10 mm aukščio įtaiso ir panardinti vonelėje (10 ± 1) mm gylyje. Termoizoliacinio kompozito bandiniai buvo mirkomi nuo 10 iki 90 min. Ištaukti iš vonelės bandiniai buvo nuvalomi medžiagine servetėle ir sveriami kas 10 min (2.10 pav.)



2.10 pav. Kapiliarinio vandens įgėrio bandymo schema

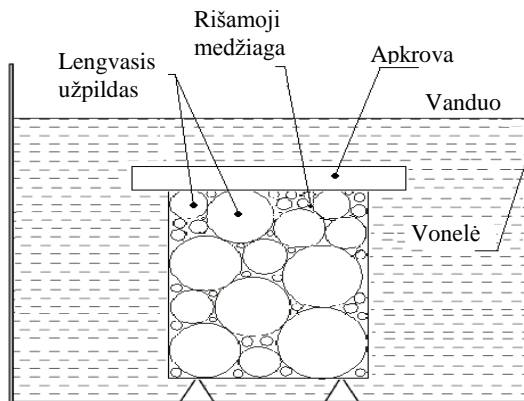
Fig. 2.10. Scheme of capillary action test

Kapiliarinės įgerties koeficientas ($c_{w,s}$) buvo apskaičiuotas pagal 2.7 formulę.

$$c_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry}}{A_s \cdot t_{so}} \cdot 10^6, \text{ g/m}^2\text{s}; \quad (2.7)$$

čia $m_{so,s}$ – per laiko tarpą t įmirkyto vandenyje bandinio masė, g; m_{dry} – išdžiovinto bandinio masė, g; A_s – visuminis įmerkto į vandenį bandinio paviršiaus plotas, mm^2 ; t_{so} – mirkymo trukmė, s.

Termoizoliacinio kompozito bandinių ilgalaikis vandens įmirkis nustatytas pagal LST EN 12087 standarto A metodą (2.11 pav.). Bandyta po penkis ($100\times100\times100$) mm dydžio kiekvienos sudėties bandinius.



2.11 pav. Ilgalaikio vandens įmirkio bandymo schema

Fig. 2.11. Scheme of long term water absorption test

Bandiniai buvo išimami po 10 min, 1 h, 7, 14 ir 28 parų ir padėti ant specialaus tinklelio 45° kampu, sausinami (10±0,5) min ir tuomet sveriami. Vandens įmirkis apskaičiuotas pagal 2.8 formulę:

$$W_{i(2A)} = \frac{m_i - m_0}{V} \cdot \frac{100}{\rho_w}, \% \quad (2.8)$$

čia m_i – per laiko tarpą įmirkyto vandenyje bandinio masė, kg; m_0 – pradinė bandinio masė, kg; V – bandinio tūris, m³; ρ_w – vandens tankis lygus 1000 kg/m³.

Termoizoliacinio kompozito bandinių drėgminės plėtos w_d ir džiūstamojo susitraukimo w_s deformacijų dydžiai buvo nustatyti pagal LST EN 772-14 metodiką. Bandyta po šešis (160×40×40) mm dydžio kiekvienos sudėties bandinius. Termoizoliacinio kompozito bandinių ilgio pokytis matuotas skaitmeniniu indikatoriumi „Mitutoyo ID-C112B“, prietaiso tikslumas 0,001 mm, naudojant kompiuterinę programą „DMX Viewer“.

Drėgminė plėtra w_d ir džiūstamasis susitraukimas w_s apskaičiuotas pagal 2.9 formulę:

$$\frac{\Delta l_i}{l} = \frac{(l_{li} - l_{0i})}{l_{0i}} \cdot 1000, \text{ mm/m}; \quad (2.9)$$

čia $\Delta l_i / l$ – pavienis drėgminės plėtos/džiūstamojo susitraukimo koeficientas, mm/m; l_{0i} – pradinis bandinio ilgis, mm; l_{li} – bandinio ilgis po mirkymo/džiovinimo, mm.

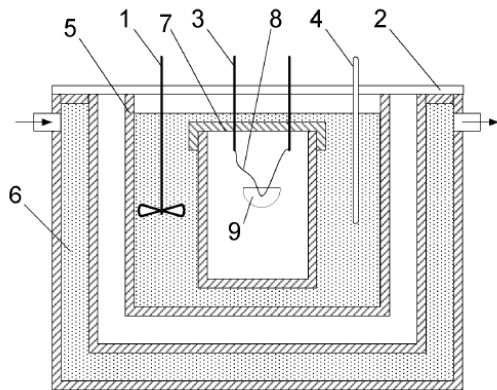
Termoizoliacinio kompozito bandinių ilgalaikiškumas buvo vertinamas pagal metodiką nustatant struktūros rodiklius ir prognozuojant eksploatacinį atsparumą šalčiui, kuris parodo medžiagos ilgalaikiškumo potencialą vertinant vienusio šaldymo ir atšildymo būdu ir tiesiogiai pagal standarto LST L 1428.17 metodiką tūrinio šaldymo ir atšildymo būdu.

Prognozuojamasis eksploatacinis atsparumas šalčiui apskaičiuotas pagal metodiką nustatant bandinių makrostruktūrinius rodiklius (Mačiulaitis 1996; Mačiulaitis *et al.* 2008).

Termoizoliacinio kompozito bandinių, pagamintų iš skirtingų sudėčių, atsparumas šalčiui tūrinio šaldymo ir atšildymo būdu nustatytas pagal LST L 1428. Po nustatyto šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus (25, 100 ir 200 ciklų) buvo nustatomas bandinių gniuždymo stipris pagal LST EN 12390-3.

Naujai sukurto termoizoliacinio kompozito bandiniai buvo tirti pagal 4 de-
gumo nustatymo atvejus.

Suminė degimo šiluma ir visuminė degimo šiluma buvo nustatyta pagal LST EN ISO 1716:2010 standarto reikalavimus. Bandyta po tris termoizoliacinio kompozito su putstilio granuliu ir trupintos EPS atliekos užpildu bandinius. Tyrimų metu buvo nustatoma visuminė sudegimo šiluma (šilumingumas PCS). Šio bandymo metu nustatoma, kokį šilumos kiekį išskiria visiškai sudegęs termoizoliacinis kompozitas. Šiam tikslui pasiekti naudojama speciali įranga (2.12 pav.).



2.12 pav. Kalorimetro schema: 1 – maišiklis; 2 – apvaskalo dangtis; 3 – uždegimo laidai; 4 – termometras; 5 – kalorimetro indas; 6 – vanduo apvaskale; 7 – kalorimetrinė bomba; 8 – padegamoji viela; 9 – tiglis su bandiniu

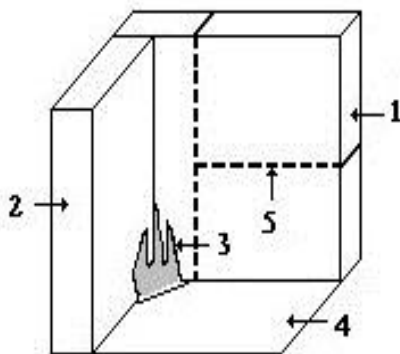
Fig. 2.12. Calorimeter scheme: 1 – mixer for uniform mixing of water, 2 – jacket cover, 3 – fuse cables, 4 – water thermometer, 5 – calorimeter vessel, 6 – water in the jacket, 7 – calorimetric bomb, 8 – fuse wire, 9 – crucible containing the sample

Organinių medžiagų nustatymo tyrimai buvo atlikti pagal LST EN 13820. Metodus taikomas nustatant organinę dalį neorganiniuose gaminiuose. Bandyta po tris termoizoliacinio kompozito su putstilio granulių užpildu bandinius.

Nedegumo bandymas atliktas pagal LST EN ISO 1182 standarto reikalavimus. Bandyta po tris termoizoliacinio kompozito su putstilio granulių ir trupintos EPS atliekos užpildu bandinius. Šis bandymo metodas apibrėžia vienalyčių statybos gaminių ir nevienalyčių statybos gaminių pagrindinių sudedamųjų dalių nedegumo nustatymą, kai gaminiai yra nevysiškai inertiški, tačiau veikiami maždaug 750 °C temperatūros, išskiria tik labai mažą šilumos kiekį ir mažai liepsnoja.

Gaminių reakcijos į ugnį bandymai atlikti pagal LST EN 13823. Šis standartas apibrėžia bandymo metodą, kaip nustatyti statybos gaminių degumo charakteristikas, veikiant bandinius vieno degančio objekto šiluma (dar vadinamas SBI). SBI bandymo įrangą sudaro bandymų patalpa, bandymų aparatūra (vežimėlis, rėmas, degikliai, gaubtas, kolektorius ir vamzdžių sistema), dūmų išmetimo sistema ir bendroji matavimo įranga.

Bandyta po tris termoizoliacinio kompozito su putstilio granulių ir trupintos EPS atliekos užpildu bandinius. Bandinį sudaro du sparnai, vadinami trumpuoju ir ilguoju sparnais. Trumpojo sparno plotis ir ilgis (495×1500) mm, ilgojo sparno – (1000×1500) mm, bandinių storis – 150 mm. Bandinio veikimo ugnimi trukmė – 20 min. Bendras nustatymo veikiant bandinius vieno degančio objekto šiluma stendo vaizdas pateiktas 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Bandinių montavimo schema: 1– ilgasis sparnas; 2 – trumpasis sparnas; 3 – degiklis; 4 – vežimėlis; 5 – sujungimai (Kligys 2009)

Fig. 2.13. Test scheme of samples mounting: 1– long wing; 2 – short wing; 3 – burner; 4 – wagon; 5 – fixings (Kligys 2009)

Termoizoliacinio kompozito bandinių mikrostruktūros tyrimai atlikti skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu su rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometru „FEI Helios NanoLab 650“, skiriamoji mikroskopo geba 0,8 nm. Prieš mikrostruktūros tyrimą bandiniai buvo laužiami rankiniu būdu ir padengiami anglies sluoksniu. Bandymo metu buvo fotografuojamos matricos sąlyčio zonos tarp matricos ir tarpų, tarpų paviršiai.

Ekspperimentinių duomenų statistinis apdorojimas. Nustatinėjant skirtingų priedų ir lengvųjų užpildų poveikį cementinės matricos ir termoizoliacinio kompozito fizikinėms ir mechaninėms savybėms buvo taikomas matematinis statistinis duomenų įvertinimas.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad termoizoliacinio cementinio kompozito fizikinių-mechaninių savybių gerinimui efektyviai gali būti naudojami metakaulinės atliekos priedas, plastifikuojančios ir orą įtraukiančios įmaišos, lengvieji užpildai. Jų efektyvumą užtikrina tinkamų sudėčių ir kiekių parinkimas – 93 % kompozito tūrio sudaro užpildai (vienu atveju putstiklio granulės (PSG), kitu atveju putstiklio granulės (PSG) ir trupinto polistireninio putplasčio atlieka (trupinta EPS atlieka) ir 7 % modifikuota cemento tešla.
2. Nustatyta, kad šiuolaikiniai tyrimų metodai leidžia efektyviai įvertinti cemento tešlos bei cemento akmens savybes, priedų poveikį jų fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei termoizoliacinio cementinio kompozito šiluminius, stipruminius, drėgminius, matmenų pastovumo, degumo bei struktūrinius rodiklius.

Cementinės matricos ir termoizoliacinio kompozito tyrimai

Šių tyrimų tikslas yra: 1. nustatyti modifikuojančių priedų poveikį cemento tėslos hidratacijos kinetikai ir formavimo mišinių porizacijai priklausomai nuo mišinių maišymo trukmės; 2. ištirti priedų poveikį cemento akmens fizikinėms ir mechaninėms savybėms (tankiui, gniuždymo ir lenkimo stipriui), makro- ir mikrostruktūrai; 3. nustatyti cementinės matricos kiekio ir lengvųjų užpildų poveikį kompozito eksploatacinėms savybėms (tankiui, gniuždymo ir lenkimo stipriui, šilumos laidumo koeficientui, įmirkiui, džiūstamajam susitraukimui, garų laidumui, atsparumo ugniai, ilgalaikiškumui) ir makro- ir mikrostruktūrai.

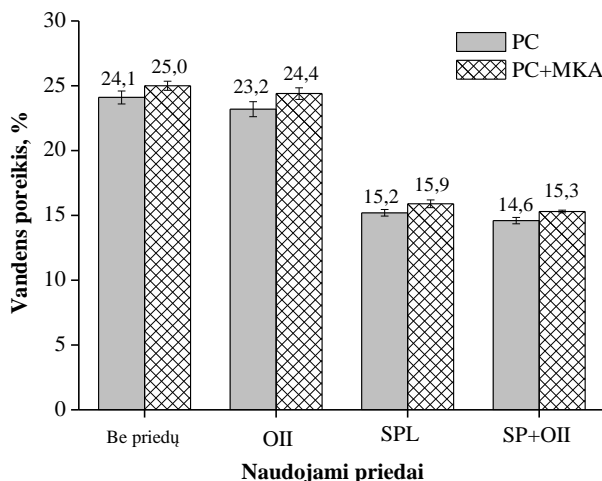
Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Šeputytė-Jucikė, Sinica 2016; Šeputytė-Jucikė *et al.* 2014; Pundienė *et al.* 2014; Šeputytė, Sinica 2013) ir įregistruotas vienas patentas Lietuvos patentų biure (Sinica *et al.* 2015).

3.1. Modifikuojančių priedų poveikis cemento tešlos savybėms

3.1.1. Vandens kiekio poreikis modifikuotai cemento tešlai

Parenkant formavimo mišinių sudėtį, modifikuojančių priedų poveikis vandens kiekiui mišiniuose nustatytas procentais nuo rišamosios medžiagos kiekio reikiamam tešlos sklidumui (150 ± 5) mm gauti.

Keičiant 10 % PC masę MKA, kai nėra naudojamos SPL ir OII įmaišos, vandens kiekio poreikis cemento tešlai padidėja 0,9 % lyginant su kontroliniu bandiniu vien tik iš PC (3.1 pav.). Tai paaiškina skirtingos MKA ir PC dalelių charakteristikos. Dalelių dydžio analizė (2.1 ir 2.2. pav.) parodė, kad MKA sudaro smulkesnės dalelės nei PC (kurio dalelių dydis daugiau nei du kartus didesnis pagal Blaino vertę), todėl joms drėkinti reikia didesnio vandens kiekio, taip pat vandens kiekio padidėjimas tiesiogiai susijęs su MKA priedo savitojo paviršiaus ploto padidėjimu, palyginti su PC. Mažesnio dydžio ir didesnio specifinio paviršiaus MKA dalelės vandeniniame tirpale adsorbuoja daugiau vandens molekulių, išbrinkusios didina mišinio klampą, tūrį, pasidaro sunkiai išmaišomos (Subaši, Emiroğlu 2015), todėl, keičiant 10 % PC masės MKA, cemento tešloje yra didinamas vandens kiekis.



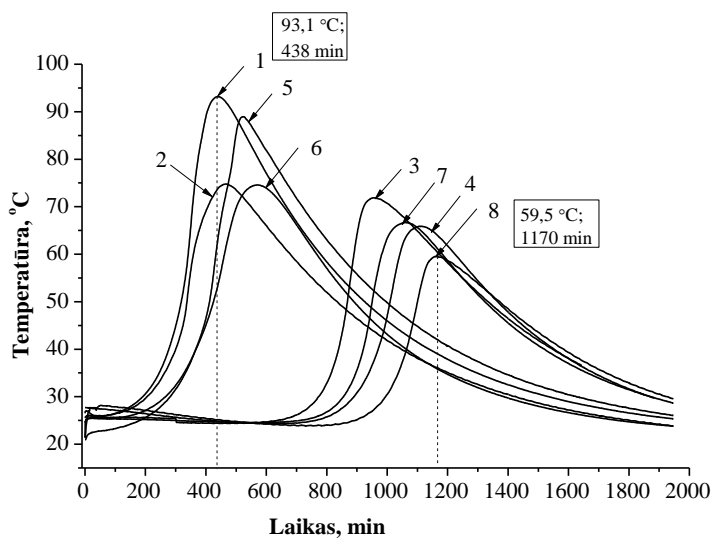
3.1 pav. Skirtingų priedų poveikis 150 ± 5 mm sklidumo cemento tešlos vandens poreikiui

Fig. 3.1. Effect of different additives on water content in cement paste mixtures at 150 ± 5 mm propagation

Kaip matome iš 3.1 paveikslo, SPL gerokai sumažina cemento tešlai reikalingą vandens kiekį. Kai naudojamas SPL tik su PC, vandens kiekis sumažėja 8,9 %, o kai naudojamas SPL, 10 % PC masės pakeičiant MKA, reikiamas vandens kiekis sumažėja iki 9,1 %. Tai galima paaiškinti specifiniu superplastiklio poveikiu mišinio sudėtinių komponentų dalelėms – jis jas disperguoja, mažina vandens paviršiaus įtempimą, taip palengvindamas laisvo vandens prasiskverbimą tarp mišinio dalelių, užtikrindamas visišką jų drėkinimą ir padidindamas vandens įgėrį. Kai į minėtus mišinius (su PC (1), PCA+MKA (5) ir PC+MKA+SPL (7) (1, 5 ir 7 cementinės matricos sudėtyje nurodytos 2.4 lentelėje)) pridedama OII, reikiamas vandens kiekis sumažėja nedaug iki 0,6 %.

3.1.2. Cemento tešlos hidratacijos kinetika

Modifikuojančių priedų poveikį cemento tešlos hidratacijos procesui parodė atlikti kalorimetriniai matavimai. Jų rezultatai pateikti 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Priedų poveikis cemento tešlos hidratacijos egzoterminei reakcijai:
1–8 cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.2. Effect of additives on the exothermal reaction of hydration process of fresh cement paste mixtures: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Mūsų atveju buvo nagrinėtas 3 hidratacijos periodo pabaigos taškas, kuriame egzoterminės reakcijos (egzo) efekto temperatūra yra didžiausia. 3.2. paveiksle matome, kad 1 kreivė, kai naudojamas tik PC, hidratacijos egzo maksimali temperatūra (93,1 °C) pasiekama per 438 min, nes esant didžiausiai temperatūrai cemento tešlos hidratacija vyksta greičiausiai. Keičiant 10 % PC masės MKA priedu (5 kreivė), cemento tešlos hidratacija šiek tiek pailgėja, dėl sumažėjusio PC kiekio egzo maksimumas pasiekamas po 522 min, egzo maksimumo temperatūra siekia 88,5 °C.

Tyrimų duomenys rodo (3.2 pav.), kad OII įmaišos naudojimas skirtingai veikia egzo reakcijos temperatūrą ir laiką (2 ir 6 kreivės). Naudojant OII įmaišą su grynu PC ir kai 10 % PC keičiama MKA, egzo temperatūros maksimumo pasiekimo laikas tik labai nedaug sulėtėja, o temperatūra atvirkščiai – gryno PC su OII sumažėja iki 75 °C, o kai 10 % PC keičiama MKA – iki 74,5 °C.

SPL įmaiša, kaip ir visi plastikliai (Ferraris 2001; Ozawa, Ouci 2011) smarkiai lėtino cemento mineralų hidratacijos procesą (3 ir 7 kreivės). Esant sudėčiai iš gryno PC, buvo pasiektas 960 min mineralų hidratacijos egzo reakcijos maksimumas, o egzo maksimali temperatūra siekė 72 °C (3 kreivė). Esant sudėtyje PC ir 10 % MKA priedui, egzo maksimumas buvo pasiektas dar šiek tiek vėliau. Po 1060 min temperatūra buvo dar šiek tiek žemesnė – 66,5 °C (7 kreivė). Šiam procesui turi įtakos cemento dalelių paviršiuje susidaręs vandens sluoksnis, padengtas superplastiklio plėvele, kuri stabdo mineralų hidrataciją (Lazniewska-Piekarczyk 2014).

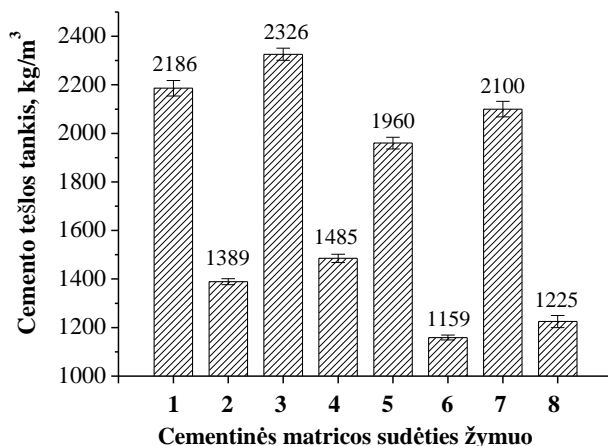
Hidratacijos procesas labiausiai buvo stabdomas, kai formavimo mišiniuose buvo panaudotos abi įmaišos, t. y. SP ir OII kartu. Šios įmaišos, kai formavimo mišinys iš gryno PC, pailgina cemento mineralų hidratacijos egzo maksimumą nuo 438 iki 1118 min, o temperatūrą sumažina nuo 93,1 iki 65,9 °C (lyginti 1 ir 4 kreives). Kai cemento tešloje 10 % PC masės pakeičiama MKA priedu, egzo maksimumo temperatūra pailgėja nuo 522 iki 1170 min, o temperatūra sumažėja nuo 88,5 iki 59,5 °C (lyginti 5 ir 8 kreives).

3.1.3. Cemento tešlos tankis

Modifikuojančių priedų ir maišymo trukmės poveikis formavimo mišinių tankiui pateiktas 3.3 ir 3.4 paveiksluose.

3.3 paveiksle pateikti duomenys rodo, kad 10 % PC masės kiekio pakeitimas pucolaniniu priedu – MKA sumažina cemento tešlos tankį nuo 2186 iki 1960 kg/m³ (lyginti 1 ir 5 sudėties stulpelius). Panaudojus SPL įmaišą cemento tešlos tankis padidėja, kai vien tik su PC nuo 2186 iki 2326 kg/m³ (lyginti 1 ir 3 sudėties stulpelius), o 10 % PC masės kiekio pakeitus MKA priedu – nuo 1960 iki 2100 kg/m³ (lyginti 5 ir 7 sudėties stulpelius). Didžiausią poveikį cemento tešlos tankiui turėjo OII įmaiša. 3.3 paveikslo 2, 4, 6 ir 8 sudėties stulpeliai rodo,

kad OII įmaiša leido 5 min maišius gerokai sumažinti cemento teslos tankį. Cemento teslos tankis sumažėjo net iki 44 % ir panaudojus visus tris priedus (MKA, SPL, OII) siekė 1225 kg/m³.



3.3 pav. Priedų poveikis cemento teslos tankiui: 1–8 cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.3. Effect of additives of a fresh cement paste mixture: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Naudojant mišiniuose OII įmaišą, cemento teslos tankis ir porėtumo dydis priklausė nuo maišymo trukmės. Tankis nustatytas maišant mišinį 2, 5 ir 10 min (3.4 pav.). Reikėtų pažymėti, kad ilgesnis mišinio maišymas yra nenaudingas technologiškai ir ekonomiškai.

Visų sudėčių cemento teslą sutankina SPL įmaiša, o MKA priedas ir OII mažina cemento teslos tankį. Maišant cemento teslą, kai yra naudojamas OII, mažinamas skystos fazės paviršiaus įtempis ir maišant joje susidaro tam tikro skersmens oro tuštumos (Kligys, 2009). Kuo ilgesnė cemento teslos maišymo trukmė naudojant OII, tuo intensyviau vyksta oro tuštumų susidarymo procesas, dėl kurio kinta cemento teslos tankis, nes vis susidaro naujų oro tuštumų.

3.4 paveiksle pateikta cemento teslos tankio priklausomybė nuo maišymo laiko, panaudojant OII. Cemento teslos tankio priklausomybė nuo maišymo trukmės aprašyta regresinėmis lygtimis: 2 sudėties – (3.1), 4 sudėties – (3.2), 6 sudėties – (3.3), 8 sudėties – (3.4).

$$\rho_{ct2} = 2187,99 - 197,02 \cdot t + 7,50 \cdot t^2, \quad (3.1)$$

kai $R^2 = 0,995$ ir $S_R = 49,2$;

$$\rho_{ct4} = 2322,15 - 212,78 \cdot t + 8,87 \cdot t^2, \quad (3.2)$$

kai $R^2 = 0,999$ ir $S_R = 25,3$;

$$\rho_{ct6} = 1962,22 - 197,33 \cdot t + 7,46 \cdot t^2, \quad (3.3)$$

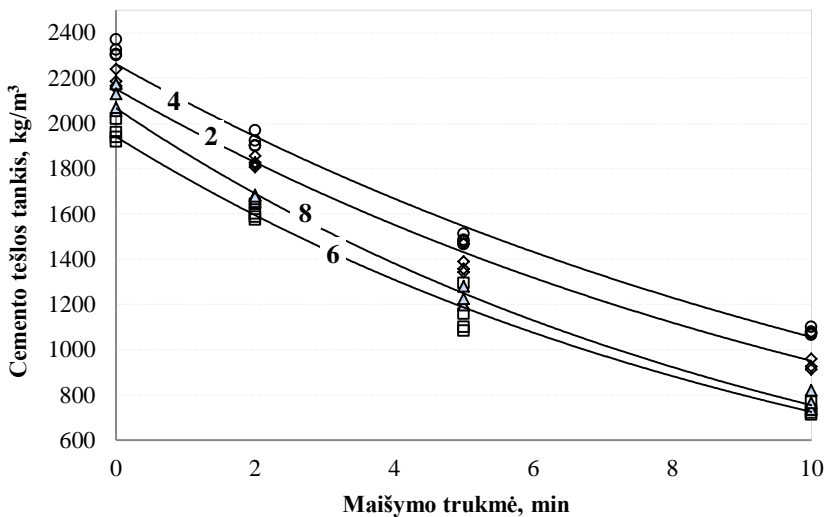
kai $R^2 = 0,994$ ir $S_R = 53,9$;

$$\rho_{ct8} = 2097,7 - 220,98 \cdot t + 8,80 \cdot t^2, \quad (3.4)$$

kai $R^2 = 0,997$ ir $S_R = 40,7$;

čia ρ_{ct} – cemento tešlos tankis, kg/m^3 ; t – maišymo trukmė, min; R^2 – determinacijos koeficientas; S_R – standartinis nuokrypis.

Determinacijos koeficientas kintantis nuo 0,994 iki 0,999 rodo, kad kartojant bandymą cemento tešlos tankio vertės gali tik apie 1 % nukrypti nuo šių reikšmių.



3.4 pav. Maišymo trukmės poveikis cemento tešlos tankiui:

2, 4, 6, 8 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.4. Effect of a mixing duration on the density of a fresh cement paste mixture:

2, 4, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

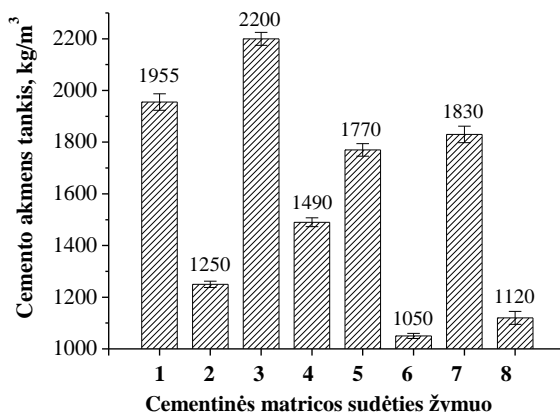
3.4 paveiksle matome, kad naudojant OII įmaiša tešlos tankį galime sumažinti ~2,6 karto (2 kreivė). Kai yra naudojami MKA priedas ir OII įmaiša, priklausomai nuo maišymo trukmės cemento tešlos tankis sumažėja nuo 1960 iki 735 kg/m³ (6 kreivė). Cemento tešlos tankis, kai buvo kompleksiskai panaudoti visi trys matricą modifikuojantys priedai (MKA, OII ir SPL), priklausomai nuo maišymo trukmės, sumažėjo nuo 2100 iki 765 kg/m³, t. y. po 10 min maišymo 3,3 karto (8 kreivė). Šiuo atveju cemento mišinys yra sutankinamas, o tik paskui porizuojamas. Svarbų vaidmenį šiame procese atlieka dėl MKA priedo sutirštinta mišinių masė, leidžianti susidaryti įtraukto oro burbuliukams ir užtikrinanti jų stabilumą, kartu ir porėtos cemento tešlos stabilumą.

Ištirta, kad kompleksinis (MKA, SPL ir OII) priedų poveikis mažinant cemento tešlos tankį labiausiai pastebimas kai 10 % PC masės kiekio pakeičiama pucolaniniu MKA priedu. Visų trijų priedų naudojimas leido sumažinti tankį 65 %, palyginant su gryno PC tešlos tankiu.

3.2. Modifikuojančių priedų poveikis cemento akmens savybėms

3.2.1. Cemento akmens tankis

Pasirinktų priedų poveikis cemento akmens tankiui, priklausantis nuo naudotų priedų ir mišinio maišymo trukmės, pateiktas 3.5 ir 3.6 paveiksluose.



3.5 pav. Priedų poveikis cemento akmens tankiui: 1–8 cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.5. Effect of additives on cement stone density: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Tiriant priedų poveikį akmens savybėms 3.5 paveiksle galime pastebėti kad cemento akmens tankis, kaip ir cemenos tešlos atveju, sumažėja, kai 10 % PC masės kiekio pakeičiama pucolaniniu MKA priedu. Cemento akmens tankis sumažėjo nuo 1955 iki 1770 kg/m³ (lyginti 1 ir 5 sudėties stulpelius). SPL įmaišos panaudojimas gryno PC akmens tankį padidina 12,5 % (lyginti 1 ir 3 sudėties stulpelius), o 10 % PC masės kiekio pakeitus MKA priedu – 3,4 % (lyginti 5 ir 7 sudėties stulpelius). Didžiausias tankio sumažėjimas įvyksta kai pridedama OII (2, 4, 6 ir 8 sudėties stulpeliai). Kompleksiškai panaudoti visi trys priedai (MKA, SPL, OII) sumažina cemento tankį nuo 1955 iki 1120 kg/m³, t. y. 42,7 % po 5 min maišymo.

OII įmaiša leido gerokai sumažinti cemento akmens tankį, suteikdamas jam porėtą struktūrą. Porėtumo dydis priklausė nuo cemento tešlos maišymo su OII trukmės (3.6 pav.). 3.6 paveiksle pateikta cemento akmens tankio priklausomybė nuo maišymo laiko, panaudojant OII. Cemento akmens tankio priklausomybė nuo maišymo laiko aprašyta regresinėmis lygtimis: 2 sudėties – (3.5), 4 sudėties – (3.6), 6 sudėties – (3.7), 8 sudėties – (3.8).

$$\rho_{ca} = 1948,15 - 176,27 \cdot t + 7,16 \cdot t^2, \quad (3.5)$$

$$\text{kai } R^2 = 0,989 \text{ ir } S_R = 64,2;$$

$$\rho_{ca4} = 2228,07 - 199,67 \cdot t + 9,24 \cdot t^2, \quad (3.6)$$

$$\text{kai } R^2 = 0,985 \text{ ir } S_R = 79,9;$$

$$\rho_{ca6} = 1758,22 - 181,54 \cdot t + 7,35 \cdot t^2, \quad (3.7)$$

$$\text{kai } R^2 = 0,992 \text{ ir } S_R = 58,3;$$

$$\rho_{ca8} = 1816,02 - 185,11 \cdot t + 8,34 \cdot t^2, \quad (3.8)$$

$$\text{kai } R^2 = 0,984 \text{ ir } S_R = 76,3;$$

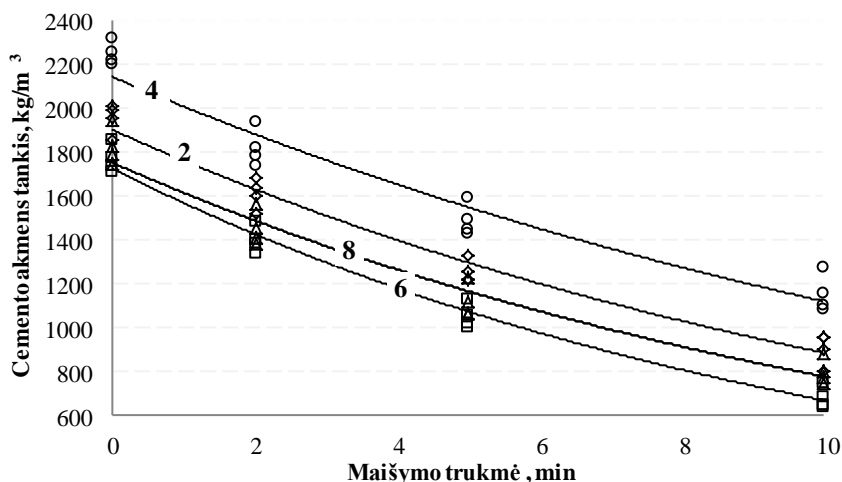
čia ρ_{ca} – cemento akmens tankis, kg/m³, t – maišymo trukmė, min. R^2 – determinacijos koeficientas, S_R – standartinis nuokrypis.

Determinacijos koeficientas kintantis nuo 0,982 iki 0,992 rodo, kad kartojant bandymą cemento akmens tankio vertės gali tik apie 1 % nukrypti nuo šių reikšmių.

Mažiausias cemento akmens tankis gautas, kai PC yra iš dalies pakeičiamas MKA priedu ir naudojamas kartu su OII. Po 2 min maišymo gryno PC tankis sumažėjo nuo 1955 iki 1600 kg/m³, o MKA modifikuoto cemento iki 1400 kg/m³. Maišant mišinius atitinkamai 5 ir 10 min pavyko sumažinti porėto

cemento akmens tankį gryno PC iki 1250 ir 900 kg/m^3 , su MKA priedu iki 1050 ir 675 kg/m^3 (2 ir 6 kreivės).

SPL įmaiša betono bandinio porėtumo sumažėjimą pristabdo (4 ir 8 kreivės). Naudojant ruošiamuose formavimo mišiniuose vien PC su SPL, tankis pamaišius mišinį iki 10 min, pakito nuo 2200 iki 1150 kg/m^3 (4 kreivė), o modifikuoto MKA atitinkamai nuo 1830 iki 795 kg/m^3 .



3.6 pav. Maišymo trukmės poveikis cementinio akmens tankiui: 2, 4, 6, 8 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

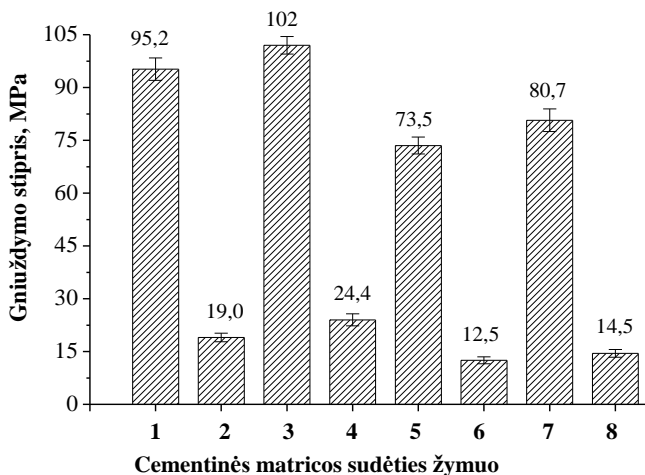
Fig. 3.6. Effect of a mixing duration on the density of a cement stone
2, 4, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Atlikti tyrimai parodė, kad naudojant visus tris priedus (MKA, OII ir SPL) kartu, cemento akmens tankis, priklausomai nuo maišymo laiko, kuris buvo 2, 5 ir 10 min, sumažėjo net 2,5 karto. Toks visų trijų priedų panaudojimas leido sumažinti tankį 59 % lyginant su gryno PC prizuotu tešlos tankiu.

3.2.2. Modifikuojančių priedų poveikis cemento akmens gniuždymo ir lenkimo stipriams

Naudojami skirtingi priedai leidžia keisti bandinių tankį ir struktūrą. 3.7 paveiksle pateiktas priedų poveikis cementinės matricos bandinių gniuždymo stipriui. MKA priedas sumažina bandinių tankį ir kartu lemia naujų sudarų susidarymą. Įdėję šio priedo gauname mažiausią tankį ir atitinkamai 23 % mažesnę stiprį (5 sudėties stulpelis), palyginti su bandiniais, pagamintais vien iš PC (1 sudėties stulpelis). SPL įmaišos kiekis 0,5 % nuo PC kiekio leidžia padidinti cemento

akmens stiprį ~7 %, dėl sumažinto iki 0,15 V/C santykio. Naudojant mišrius priedus, t. y. 10 % MKA ir 0,5 % SPL, gniuždymo stipris gaunamas ~15 % mažesnis nei bandinių vien tik su PC, bet ~10 % didesnis nei tik su MKA priedu. Taigi, SPL įmaiša teigiamai veikia kompozito gniuždymo stiprį dėl sumažinto vandens kiekio. SPL įmaišos veikimas aiškinamas tuo, kad polikarboksilatino eterio pagrindu pagaminti superplastikliai pasižymi geru cemento dalelių dispergavimu esant mažesniai V/C santykiui, kartu lemia mišinio dalelių sutankinimą, iki 50 % padidina betono tešlos sklidimą, sumažina vandens sąnaudas ir pagerina medžiagos fizikines bei mechanines savybes.



3.7 pav. Priedų poveikis cemento akmens gniuždymo stipriui: 1–8 cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.7. Effect of additives on cement stone compressive strength: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Didžiausias cemento akmens gniuždymo stiprio sumažėjimas įvyksta kai pridedama OII (2, 4, 6 ir 8 sudėties stulpeliai). 8 sudėties stulpelyje pateikta gniuždymo stiprio vertė naudojant visus priedus ir lygi 14,5 MPa. Rezultatas rodo gniuždymo stiprio sumažėjimą dėl mišinio maišymo metu padidėjusio cemento akmens poringumo, tarpporinių pertvarėlių storio sumažėjimo.

Kaip matyti iš 3.8 paveikslo, naudojant OII, labai svarbus rodiklis yra maišymo laikas. Cementinės matricos gniuždymo stiprio priklausomybė nuo maišymo laiko aprašyta regresinėmis lygtimis: 2 sudėties – (3.9), 4 sudėties – (3.10), 6 sudėties – (3.11), 8 sudėties – (3.12).

$$\sigma_2 = 94,15 \cdot e^{-0,342t}, \quad (3.9)$$

kai $R^2 = 0,993$ ir $S_R = 4,5$;

$$\sigma_4 = 100,47 \cdot e^{-0,309t}, \quad (3.10)$$

kai $R^2 = 0,987$ ir $S_R = 6,2$;

$$\sigma_6 = 72,91 \cdot e^{-0,481t}, \quad (3.11)$$

kai $R^2 = 0,992$ ir $S_R = 3,9$;

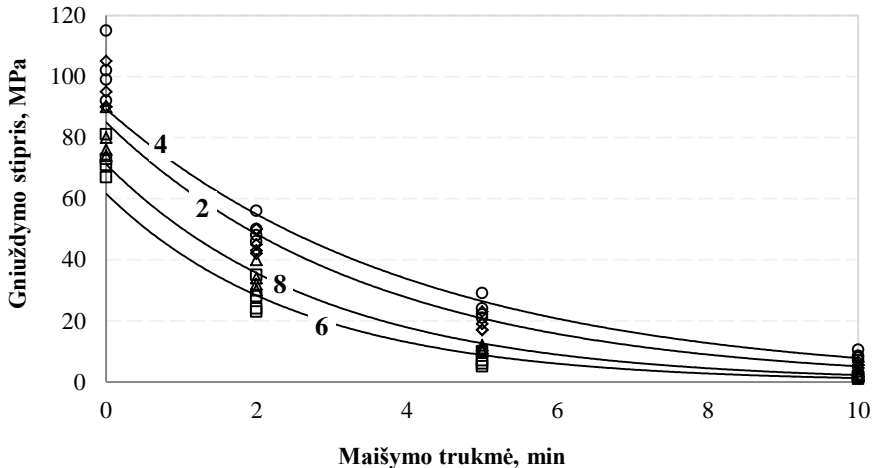
$$\sigma_8 = 79,75 \cdot e^{-0,413t}, \quad (3.12)$$

kai $R^2 = 0,992$ ir $S_R = 4,0$;

čia σ – cemento akmens gniuždymo stipris, MPa, t – maišymo trukmė, min. R^2 – determinacijos koeficientas, S_R – standartinis nuokrypis.

Determinacijos koeficientas kintantis nuo 0,987 iki 0,993 rodo, kad kartojant bandymą cemento akmens gniuždymo stiprio vertės gali tik apie 1 % nukrypti nuo šių reikšmių.

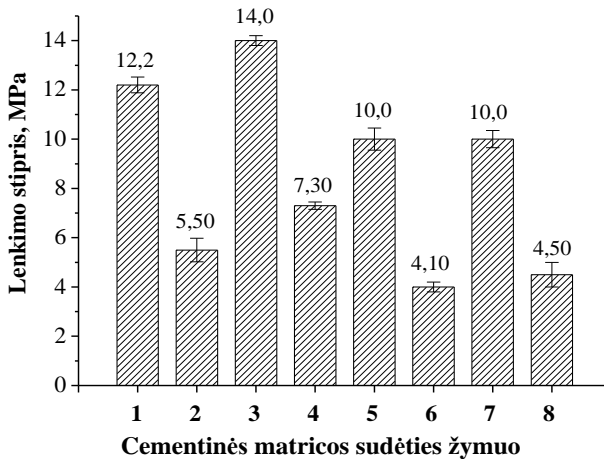
Per pirmąsias 5 min maišymo, kad ir kokie būtų kiti priedai, gniuždymo stiprio vertė sumažėja apie 10 kartų. Tai galima paaiškinti tuo, kad cemento tešla įtraukia didelį kiekį oro burbuliukų, todėl plonėja tarpporinės pertvarėlės, o kartu ir cemento akmens stiprumas.



3.8 pav. Maišymo trukmės poveikis cemento akmens gniuždymo stipriui:
2, 4, 6, 8 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.8. Effect of mixing duration on cement stone compressive strength:
2, 4, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Cemento akmens lenkimo stiprio rezultatai pateikti 3.9 paveiksle. Reikia atkreipti dėmesį, kad lenkimo stiprio verčių kitimo nuo skirtingų priedų tendencijos išlieka tokios pat kaip ir gniuždymo atveju (3.7 pav. ir 3.8 pav.) – didžiausias stipris būna įdėjus SPL įmaišos, o mažiausias – įdėjus MKA priedo.



3.9 pav. Priedų poveikis cemento akmens lenkimo stipriui: 1–8 cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.9. Effect of additives on cement stone bending strength: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Naudojant OII įmaišą (3.9 pav., 2, 4, 6, 8 sudėties stulpeliai, ir 3.10 pav.), vykstant porizacijai maišymo metu (nuo 2 iki 10 min), lenkimo stipris gerokai sumažėja. 3.10 paveiksle pateikta cementinės matricos lenkimo stiprio priklausomybė nuo maišymo laiko. Cementinės matricos lenkimo stiprio priklausomybė nuo maišymo laiko, aprašyta regresinėmis lygtimis: 2 sudėties – (3.13), 4 sudėties – (3.14), 6 sudėties – (3.15), 8 sudėties – (3.16).

$$\sigma_{b2} = 12,30 \cdot e^{-0,164t}, \quad (3.13)$$

kai $R^2 = 0,979$ ir $S_R = 0,825$;

$$\sigma_{b4} = 14,06 \cdot e^{-0,146t}, \quad (3.14)$$

kai $R^2 = 0,976$ ir $S_R = 0,982$;

$$\sigma_{b6} = 10,12 \cdot e^{-0,196t}, \quad (3.15)$$

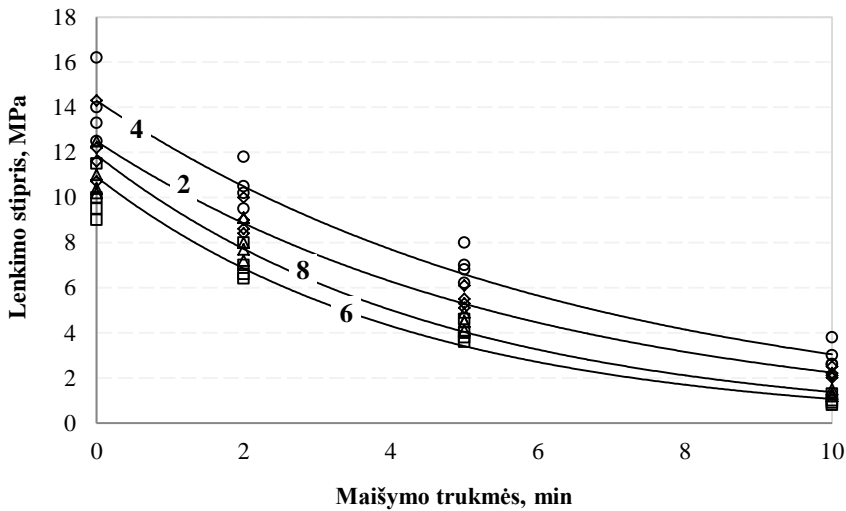
kai $R^2 = 0,982$ ir $S_R = 0,695$;

$$\sigma_{bg} = 11,21 \cdot e^{-0,188t}, \quad (3.16)$$

kai $R^2 = 0,982$ ir $S_R = 0,697$;

čia σ_b – cemento akmens lenkimo stipris, MPa, t – maišymo trukmė, min, R^2 – determinacijos koeficientas, S_R – standartinis nuokrypis.

Determinacijos koeficientas kintantis nuo 0,976 iki 0,982 rodo, kad kartojant bandymą cemento akmens lenkimo stiprio vertės gali tik apie 2 % nukrypti nuo šių reikšmių



3.10 pav. Maišymo trukmės poveikis cemento akmens lenkimo stipriui:

2, 4, 6, 8 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.10. Effect of mixing duration on cement stone bending strength:

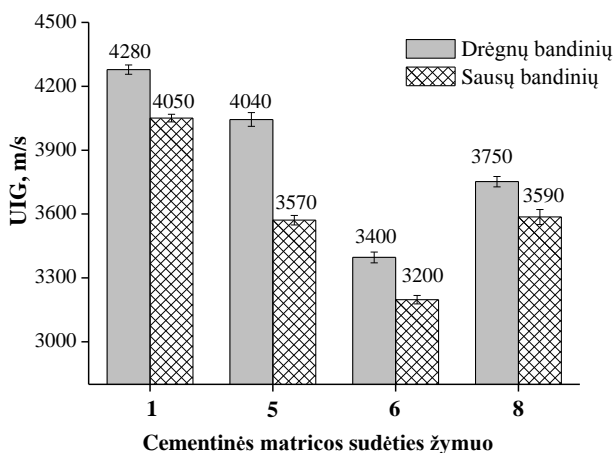
2, 4, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

Su MKA priedu gaunamas mažiausias tankis ir atitinkamai 23 % mažesnis gniuždymo ir 18 % lenkimo stipris lyginant su bandiniais pagamintais vien iš PC. Pagal gautus rezultatus galime teigti, kad kompleksiniais (MKA, SPL ir OII) priedų panaudojimas lėmė papildomų naujų – kalcio hidrosilikatų susidarymą, o tai leido padidinti mažo tankio porėto betono gniuždymo ir lenkimo stiprį.

3.2.3. Modifikuojančių priedų poveikis cemento akmens ultragarso impulso sklaidimo greičiui

Cementinės matricos bandinių struktūros pokyčiai buvo nustatyti ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimu. 3.11 paveiksle pateikti ultragarso impulso sklidi-

mo greičių cemento akmenyje palyginimo rezultatai. Didžiausias UIG (1 sudėtis) stebimas bandiniuose vien tik su PC. Didelį cementinio akmens UIG lemia didelis medžiagos tankis. Naudojant MKA (5 sudėtis), UIG mažėja, nes MKA leidžia sumažinti medžiagos tankį. Į ruošiamą tešlą papildomai pridėjus OII (6 sudėtis), cemento akmens struktūra pasidaro akytesnė, susidaro oro tuštumų, labai sumažėja cemento akmens tankis ir kartu sumažėja UIG. Siekiant padidinti cemento akmens stiprumą, į cemento tešlą papildomai įmaišoma SPL (8 sudėtis). SPL įmaišos naudojimas leidžia padidinti cemento akmens tankį, todėl UIG didėja. Kaip matyti iš 3.11 paveikslo – nemažą poveikį ultragarso impulso sklaidimo greičiui turi drėgnis. Drėgnų bandinių UIG visais atvejais nuo 5 iki 12 % didesnis nei sausų bandinių. Tai galima paaiškinti taip pat padidėjusiu bendru cemento akmens tankiu. Kadangi įvairių priedų panaudojimas leidžia gauti reikiamą tankį ir gniuždymo stiprį, tai tolimesniems kompozito tyrimams pasirenkama 8 sudėties cementinė matrica.



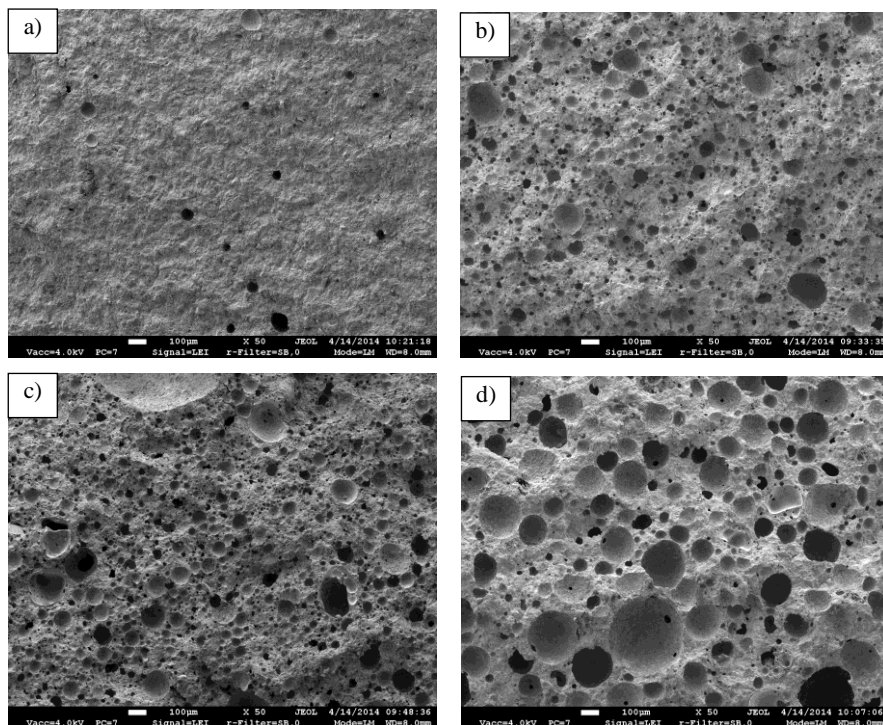
3.11 pav. UIG priklausomybė nuo cementinės matricos sudėties
1, 5, 6, 8 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.11. UVP dependence on the composition of cement paste
1, 5, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

3.2.4. Cemento akmens makrostruktūra

Naudojami priedai smarkiai keičia cemento akmens struktūrą. Gryno cemento akmens ir cemento akmens su priedais makrostruktūros tyrimų rezultatai pateikti 3.12 paveiksle. Be priedų gauto cemento akmens struktūroje (3.12 pav., a) matome vienalytę tankią medžiagą su pavienėmis poromis, kurios susidarė kietėjant išgaravus daliai vandens. Tam tikrą cemento dalį pakeitus MKA, cemento ak-

mens makrostruktūra labai pasikeičia (3.12 pav., b) – visame cemento akmens tūryje atsiranda daug smulkių ir pavienių stambesnių porų.

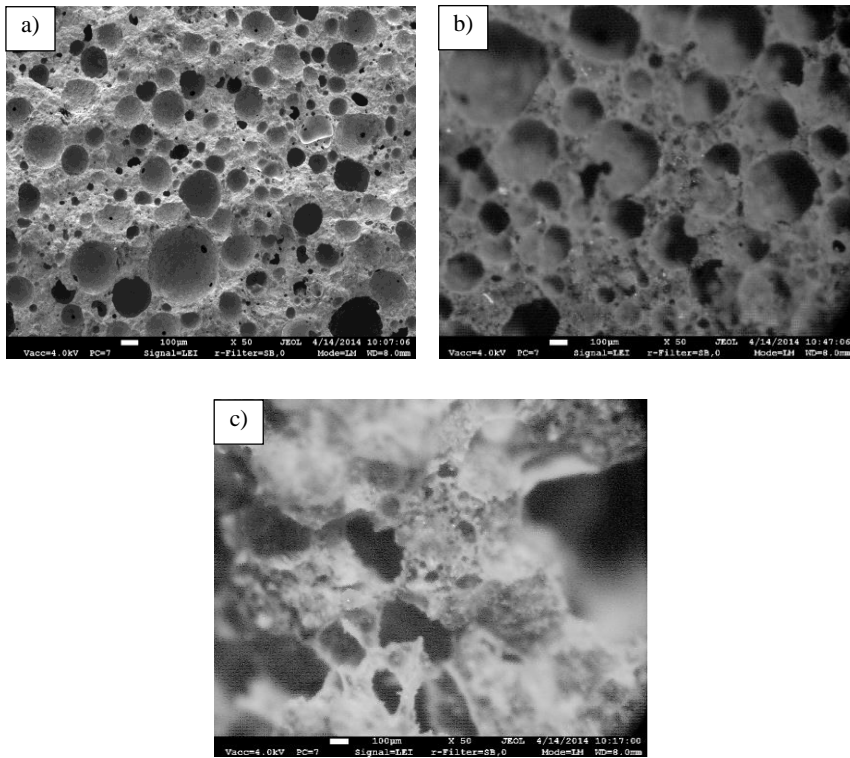


3.12 pav. Cemento akmens makrostruktūra (didinimas $\times 50$): a) – 1 (PC); b) – 5 (PC+MKA); c) – 6 (PC+MKA+OII); d) – 8 (PC+MKA+OII+SPL); 1, 5, 6, 8 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

Fig. 3.12. Macrostructure of hardened cement (magnification $\times 50$): a) – 1 (PC); b) – 5 (PC+MKW); c) – 6 (PC+MKW+AEA); d) – 8 (PC+MKW+AEA+SPL); 1, 5, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

OII naudojimas struktūrą pakeičia mažai, bet padidina bendrą cemento akmens poringumą (3.12 pav., c), tačiau pačios poros yra netaisyklingos ir visame cemento akmens tūryje išsidėsčiusios netvarkingai. O štai papildomai panaudojus SPL, cemento akmens makrostruktūra pasikeičia iš esmės (3.12 pav., d) – susidaro taisyklingos sferinės poros, visame tūryje tolygiai išsidėsčiusios didelės ir mažos akutės, o tarpporinėse pertvarėlėse taip pat matyti porizuotų smulkių porų.

Priedų poveikis makrostruktūrai tirtas po 2, 5 ir 10 min formavimo mišinio maišymo naudojant OII įmaišą. Tyrimų rezultatai pateikti 3.13 paveiksle.



3.13 pav. Cemento akmenis su PC+MKA+OII+SPL (8 sudėtis iš 2.4 lentelės) priedais esant skirtingai maišymo trukmei makrostruktūra (didinimas $\times 50$):

a) – 2 min; b) – 5 min; c) – 10 min

Fig. 3.13. Macrostructure of hardened cement paste of PC+MKW+AEA+SPL (composition 8 of table 2.4) after different mixing time (magnification $\times 50$):

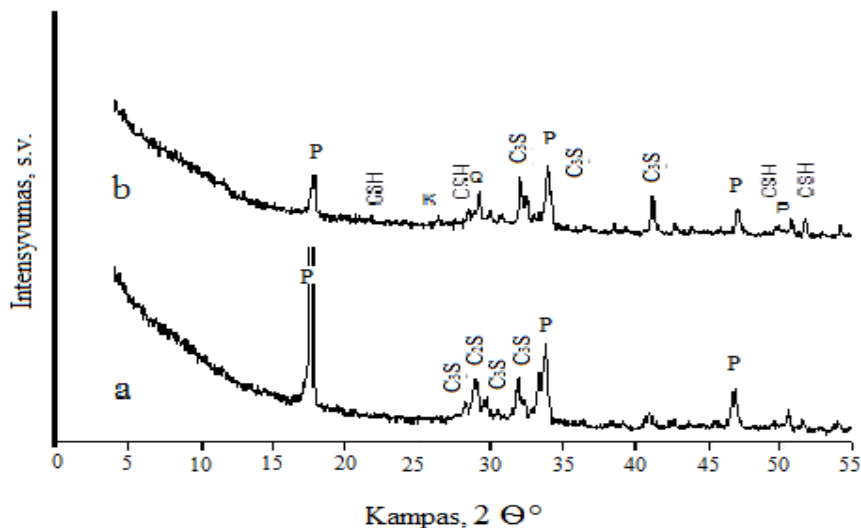
a) – 2 mins; b) – 5 mins; c) – 10 mins

OII įmaiša maišant mišinį įtraukia orą ir todėl tešloje susidaro skirtingo dydžio oro burbuliukų. Kuo ilgesnė mišinio maišymo trukmė, tuo oro sankaupos didesnės, kartu jos sudaro didesnes poras cemento akmenyje. Makrostruktūros nuotraukų ir bandinių savybių tyrimų analizė leido pasirinkti racionalią maišymo trukmę. 3.13 pav., a, pavaizduota cemento akmenis makrostruktūra po 2 min maišymo. Nuotraukoje matyti vienodai pasiskirsčiusios akutės ir susidariusios taisyklingos poros, tačiau, siekiant gauti mažo tankio ir mažo šilumos laidumo kompozitą, cemento akmenis gaunamas per didelis. Ilginant maišymo trukmę iki 5 min gaunamas cemento akmuo su stambesnėmis poromis ir dar ryškesniu tarpporinių pertvarėlių poringumu (3.13 pav., b). Maišant mišinį iki 10 min (3.13 pav., c), atsiranda didelių susisiekiančių porų. Tai reiškia, kad oro tuštumos jungiasi tarpusavyje, susidaro netaisyklingos formos ertmės, netvar-

kingai pasiskirsčiusios cemento akmenyje. Makrostruktūros analizė parodė, kad 5 min maišymo trukmė yra efektyviausia, nes uždaros poros yra tolygiai pasiskirsčiusios cemento akmenyje. Gaunamas mažo tankio ir turintis pakankamas fizikines bei mechanines savybes cemento akmuo.

3.2.5. Cemento akmens rentgenografiniai tyrimai

Rentgenografiniai tyrimai atlikti cemento akmenyje su skirtingais priedais. Tyrimų rezultatai pateikti 3.14 paveiksle. Atlikus rentgenografinę analizę nustatyta, kad bandiniuose, kai cementas modifikuotas tik OII įmaiša (a kreivė), matome cemento mineralų hidratacijos metu susidariusio portlandito intensyvias smailes. Taip pat matyti ne tokios intensyvios cemento mineralų – alito ir belito – smaилės.



3.14 pav. Cemento akmens rentgenograma: a) – 2 (PC+OII);
b) – 6 (PC+MKA+OII). 2, 6 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

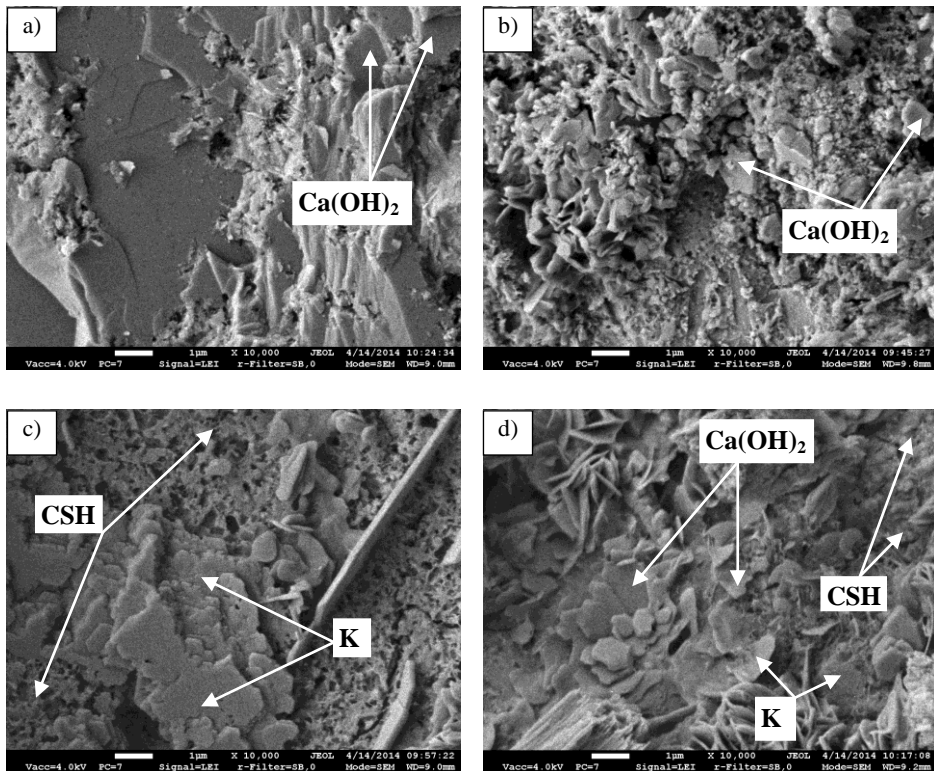
Fig. 3.14. The X-ray patterns of cement stone: a) – 2 (PC+AEA);

b) – 6 (PC+MW+AEA). 2, 6 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

B kreivėje matome, kad cementinėje matricoje panaudotas MKA priedas gerokai sumažina portlandito kiekį. Dėl MKA esančio aktyvaus SiO_2 oksido, kuris dalyvauja reakcijoje su cemento mineralų hidratacijos metu susidariusiu produktu – portlanditu, susidaro kalcio hidrosilikatų užuomazgos – CSH.

3.2.6. Cemento akmenis mikrostruktūra

Cementinės matricos bandinių rentgenografinės analizės tyrimus papildė atlikti mikrostruktūros tyrimai. Mikrostruktūra buvo tirta elektroniniu mikroskopu didinant vaizdą 10 000 kartų. 3.15 paveiksle pateiktos cemento akmenis su skirtingais priedais nuotraukos.



3.15 pav. Cemento akmenis mikrostruktūra (didinimas $\times 10\,000$): a) – 1 (PC);
b) – 2 (PC+OII); c) – 6 (PC+MKA+OII); d) – 8 (PC+MKA+OII+SPL);
1, 2, 6, 8 – cementinės matricos sudėties numeriai (2.4 lentelė)

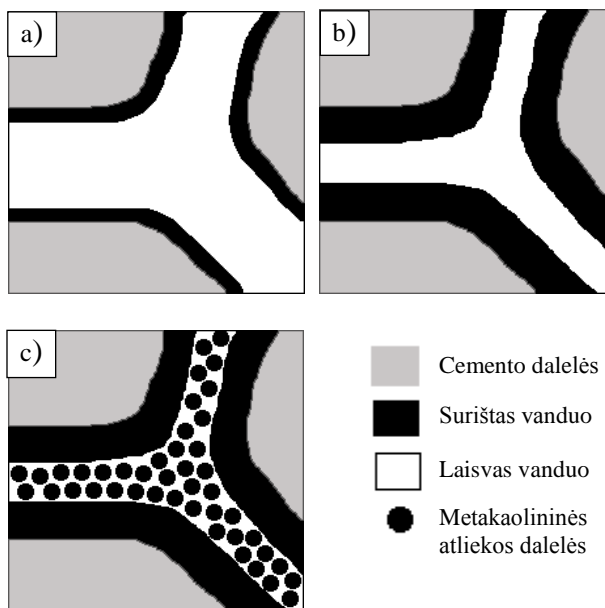
Fig. 3.15. Microstructure of cement stone (magnification $\times 10\,000$): a) – 1 (PC);
b) – 2 (PC+AEA); c) – 6 (PC+MKW+AEA); d) – 8 (PC+MKW+AEA+SPL);
1, 2, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table 2.4)

3.15 paveiksle, a, matome cemento mineralų hidratacijos produktą. Tai portlandito šešiakampės plokštelės ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Bandinių su OII įmaiša struktūra 3.15 paveiksle, b, analogiška parodytai šio paveiksle a dalyje, tačiau mūsų pasirinktas vaizdas atspindi mikrokristalinę struktūrą cementinėje matricoje su portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). 3.15 paveiksle, c, matome kalcio hidrosilikatų užuomazgas

(CSH), taip pat ten matyti ryškios dar nesureagavusio kaolinito (K) šešiakampės plokštelės. MKA ir kompleksiškai panaudotos (OII+SPL) įmaišos cementinės matricos struktūroje (3.15 pav., d) sudaro nehidratavusius cemento mineralus, hidratacijos produktą – portlanditą (Ca(OH)_2), kaolinitą (K) bei naujadarus – kalcio hidrosilikatus (CSH).

3.2.7. Cementinės matricos ir modifikuojančių priedų sąveika

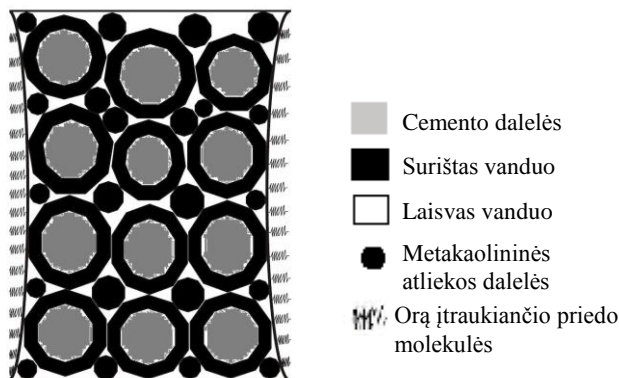
Cemento mišinio dalelių ir cementinę matricą modifikuojančių priedų (MKA, SPL, OII) tarpusavio sąveikos schemos pateiktos 3.16 ir 3.17 paveiksluose.



3.16 pav. Cemento tešlos modifikuotos skirtingais priedais schemos
Fig. 3.16. Schemes of fresh cement paste modified with different additives

3.16 paveiksle, a, pavaizduotos cemento tešloje eančios cemento dalelės su nedideliu surišto vandens kiekiu ir laisvuju vandeniu. 3.16 paveiksle, b, matome, kad panaudotas SPL įmaiša mažina vandens paviršiaus įtempimą. Vandeniniame tirpale vanduo susikaupia ant išorinių polikarboksilatinių superplastiklio polimero grandinių, o polikarboksilatas savo pagrindine grandine su funkcinėmis karbo grupėmis apgaubia cemento daleles. Dėl šito efekto adsorbuoto ant cemento dalelės vandens sluoksnis pastorėja, yra dengiamas superplastiklio plėvele, o tarpas tarp cemento dalelių mažėja. Kitame etape cemento dalelės su storu vandens sluoksniu apsaugotu plėvele, susispaudžia

tarpusavyje, tarpas tarp dalelių susiaurėja ir susidaro uždaros pilnos vandens ertmės su laisvu vandeniu. Šiame procese analogiškai brinksta ir metakaolininės atliekos dalelės, kurios tirština cemento tešlą adsorbuodamos paviršiuje vandeni (3.16 pav., c). Terpėje tarp cemento dalelių ir nesurištame vandenyje esančių metakaolininės atliekos dalelių tūris didėja, spaudžia laisvą vandenį ir sudaro slėgį, nukreiptą į išorę, o tai trukdo laisvam vandeniui tekėti tarp mišinyje esančių dalelių. Susidaro stabili sutirštinta cemento tešla, modifikuota aktyviu pucolaniniu metakaolininės atliekos priedu.



3.17 pav. Tarpporinės pertvarėlės schema
Fig. 3.17. Schemes between the pair partitions

Pridėjus į cemento tešlos mišinį OII, mišinyje prasideda sutankinto mišinio porizacija. OII molekulės adsorbuojasi ant cemento dalelių paviršiaus ir užtikrina jungtį su formuojamu oro burbuliuku, pasireiškia sąveikos kietosios, skystosios ir dujinės fazės, kurioms nugalėti vidinėse ertmėse susidaro slėgio jėgos, kad galėtų dengti kuo didesnę mišinio dalelių (PC ir MKA) kiekį. Šiame procese yra mechaniškai ardomos susidariusios cemento dalelių tarpusavio jungtys ir didinamas oro burbuliukų kiekis OII molekulių fazių sąlyčio zonose. Šis procesas yra schemiškai pavaizduotas 3.17 paveiksle.

Apibendrintai galime teigti, kad panaudojus visus tris cementinę matricą modifikuojančius priedus kartu, suformuojama stabilios struktūros cementinė matrica, kurioje PC ir MKA dalelės ir sferinės poros yra tolygiai pasiskirsčiusios cemento tešloje.

3.3. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais tyrimai

3.3.1. Lengvųjų užpildų tyrimai

Lengvųjų užpildų (PSG ir trupintos EPS atliekos) fizikinių ir mechaninių savybių tyrimų rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Užpildų fizikinės ir mechaninės savybės

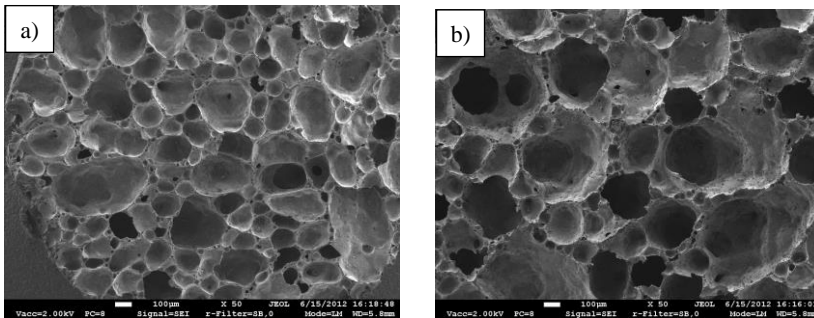
Table 3.1. Aggregate's physical and mechanical properties

Parametras, matavimo vnt.	Putstiklio granulės			Trupinta polisti- reninio putplas- čio atlieka
	Frakcijų dydis, mm			
	0–2	4–8	8–16	0–2
Piltinis tankis, kg/m ³	290	140	120	15,0
Šilumos laidumo koeficiento laboratorinė vertė, W/(m·K)	0,077	0,059	0,052	0,042
Atsparumas trupinimui, MPa	1,41	1,22	1,06	–
Masės nuostoliai po 20 šal- dymo ir atšildymo ciklų. %	1,3	1,9	2,4	–

Norint išsamiau paaiškinti putstiklio granulių fizikines savybes, buvo nustatoma dviejų skirtingų frakcijų putstiklio granulių porų mikrostruktūra. Iš 3.18 paveiksle pateiktų nuotraukų matome, kad granulių porėtumas priklauso nuo frakcijos dydžio. Pačių granulių dydis priklauso nuo malto stiklo miltų dalelių stambumo, smulkios dalelės pasidengia mažesniu kiekiu putinamos medžiagos, kuri, kaitinant iki 850 °C temperatūros, veikia stiklo dalelę ir ją išpučia.

Stambesnio malimo dalelės pasidengia didesniu putokšlio kiekiu ir kaitinimo metu sukaupia energiją išpučia stambesnę granulę, turinčią viduje stambesnes poras. Kai granulė yra iki 2 mm skersmens, porų dydžiai siekia nuo 0,001 iki 0,94 mm, o kai granulės skersmuo yra nuo 8 iki 16 mm, poros kinta nuo 0,002 iki 0,98 mm. Nuotraukose (3.18 pav.) matyti, kad granulių apsauginis kevalas – luobelė yra tankesnės struktūros, negu tarpporinės pertvaros. Taip pat matyti, kad vidinės poros daugiausia yra uždaro tipo, gaubtos porėtomis pertvarėlėmis.

Stambiausios, 8–16 mm frakcijos, PSG yra pranašesnės už kitas PSG frakcijas, jų tankis ir šilumos laidumo koeficientas mažiausi, o stiprumo savybės beveik nesiskiria nuo kitų PSG frakcijų. Mažu tankiu ir šilumos laidumo koeficientu pasižymi ir trupintos EPS atliekos.



3.18 pav. Putstiklio granulės mikrostruktūra (didinimas $\times 50$), kai frakcija:
a) – 0–2 mm; b) – 8–16 mm

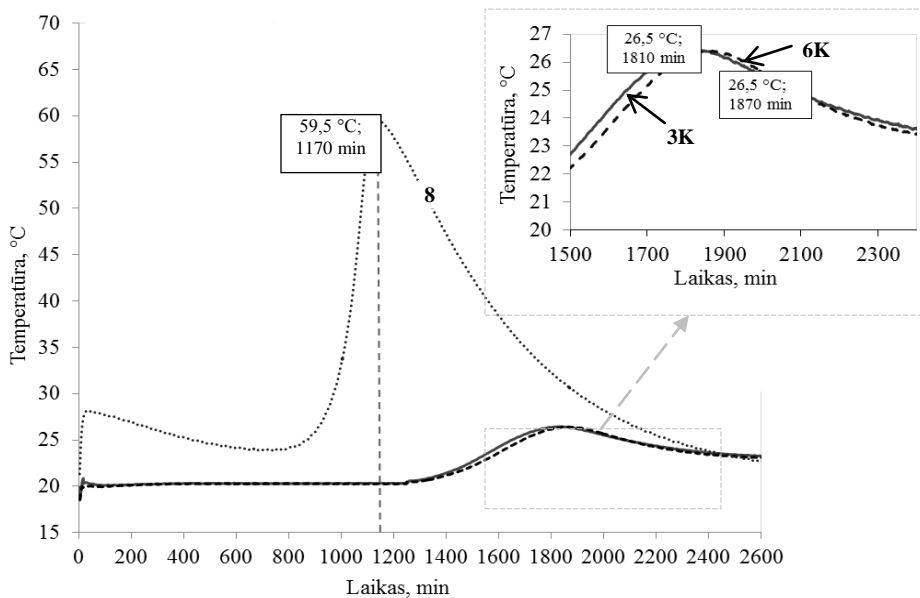
Fig. 3.18. Microstructure of blown glass bead (magnification $\times 50$), when fraction is: a) – 0–2 mm; b) – 8–16 mm

3.3.2. Lengvųjų užpildų poveikis hidratacijos kinetikai

Egzoterminės temperatūros (egzo) tyrimai leidžia įvertinti kompozito matricos ir užpildų poveikį cemento mineralų hidratacijos procesui. Termoizoliacinio cementinio kompozito su lengvaisiais užpildais tyrimų rezultatai grafiškai pateikti 3.19 paveiksle.

Egzo tyrimai rodo, kad modifikuotą priedais cementinę matricą sumaišius su lengvaisiais užpildais, cemento mineralų hidratacija sulėtėja nuo 1170 iki 1810 min, o egzoterminio efekto temperatūra sumažėjo nuo 60 iki 26 °C. Šiuos egzoterminės reakcijos pokyčius galima paaiškinti sumažėjusiu cemento teslos kiekiu bandiniuose. Mažesnis teslos kiekis sumažina išsiskiriančios šilumos kiekį tame pačiame bandinio tūryje ir kartu ilgina cemento mineralų rišimosi pradžios trukmę. Cemento mineralų hidrataciją taip pat lemia užpildo granulių kilmė. Pūstojo stiklo granulės (PSG) yra hidrofilinės. Vandeniame tirpale šių granulių išoriniame paviršiuje adsorbuojasi vandens molekulės, o tai mažina vandens kiekį mišinyje, didina jo klampą ir greitina cemento mineralų hidrataciją (Goberis, Antonovič 2007) – 3 kreivė. O štai trupinta polistireninio putplasčio atlieka (trupinta EPS atlieka) yra hidrofobinė, neįgeria vandens ir mažiau veikia mišinio klampą bei cemento mineralų hidrataciją. Tačiau egzo maksimumo pasiekimo trukmė ilgėja, nes mišinyje reikia didesnio vandens kiekio trupintos EPS atliekos išoriniam paviršiui drėkinti.

Atlikti tyrimai parodė, kad lengvieji užpildai panaudoti termoizoliacinio kompozito kūrimui 43,3 % sumažina egzo temperatūrą, o cemento mineralų hidratacijos reakcijos temperatūros maksimumas pasiekiamas 1,5 karto vėliau.



3.19 pav. Cemento tešlos su skirtingais lengvaisiais užpildais temperatūros kitimo kreivės: 8 – cemento tešla (PC+MKA+OII+SPL); 3K – cemento tešla su PSG; 6K – cemento tešla su PSG ir trupinta EPS atlieka

Fig. 3.19. Hydration temperature curves of cement paste with different aggregates: 8 – pure cement paste (PC+MKW+AEA+SPL); 3K – cement paste with CGB; 6K – cement paste with CGB and crushed EPS waste

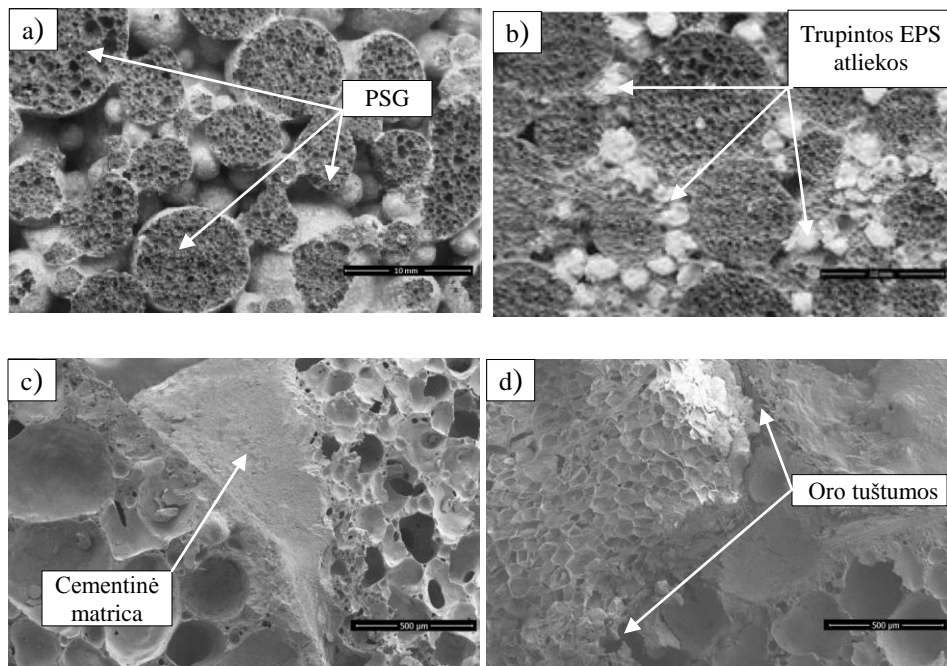
3.3.3. Termoizoliacinio kompozito makro- ir mikrostruktūra

Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais makro- ir mikrostruktūros nuotraukos pateiktos 3.20 paveiksle.

3.20 paveiksle, a, pateiktas kompozito su PSG vaizdas. Kaip matyti iš paveikslo, tarp granulių yra oro tarpų nes nepakanka smulkių granulių ar cemento tešlos jiems užpildyti. Oro tarpai yra 1–3 mm dydžio. Kai naudojamas mišrus užpildas, oro ertmės kompozite užpildo smulkios EPS dalelės (3.20 pav., b). Kaip rašo kiti autoriai (Sinica *et al.* 2008), didelėse oro tuštyms intensyvěja šilumos perdavimas dujomis.

Kontaktinių zonų tarp užpildų ir rišamosios medžiagos vaizdas pateiktas 3.20 paveiksle, c ir d. Šiame paveiksle, c, matyti skirtingo dydžio PSG, susijungusios su cemento tešla. Nuotraukoje matyti, kad kontaktinėse zonose granulės su cemento tešla gerai susijungusios, nėra tuštymų ar supleišėjimų. 3.20 paveiksle, d, parodytos kontaktinės zonos tarp trupintos EPS atliekos dalelių ir cemento tešlos. Kaip matyti iš paveikslo, atskiros kontaktinėse zonose tarp EPS

dalelių ir cemento tešlos susidarę oro tarpai. Tai reiškia, kad pasitaiko vietų, kuriose trupintos polistireninio putplasčio atliekos dalelės ir cemento tešla prastai sukimba.



3.20 pav. Kompozito su lengvaisiais užpildais vaizdas: a) – su PSG užpildu; b) – su mišriu užpildu; c) – kontaktinė zona tarp PSG; d) – kontaktinė zona tarp PSG ir trupintų EPS atliekos dalelių

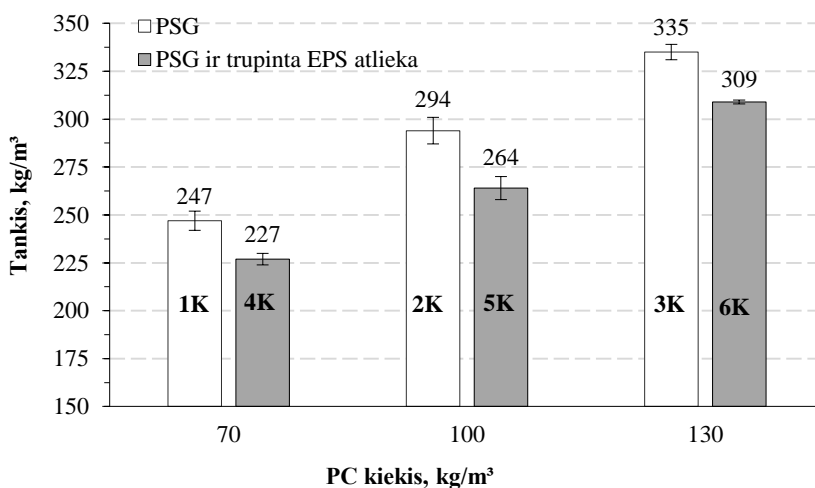
Fig. 3.20. View of lightweight aggregate composite: a) – with CGB aggregate; b) – with mixed aggregate; c) – contact zone between CGB; d) – contact zone between CGB and crushed EPS waste particle

Analogiškai teigė Turkmen ir Kontarci (2007), kad, keičiant iki 15 % natūralų betono užpildą pūsto perlito užpildu, padidėja poringumas ir kontakto zonoje atsiranda spragų. Kligys (2009) savo disertaciniame darbe rašo, kad mažo, 150 kg/m^3 , tankio kompozicinėse medžiagose su trupintas polistireninio putplasčio atliekomis atsiranda oro tarpų tarp cementinės matricos ir trupintos polistireninio putplasčio atliekos.

3.3.4. Termoizoliacinio kompozito tankis

Vienas pagrindinių statybinių medžiagų rodiklių yra tankis. Tankis tiesiogiai ar netiesiogiai lemia daugumą medžiagos savybių. 3.21 paveiksle pateikti kompozito su PSG bei PSG ir trupintos EPS atliekos užpildais tankio nustatymo rezultatai.

Iš 3.21 paveikslo matyti, kad bendrą termoizoliacinio kompozito tankį lemia rišamosios medžiagos ir užpildų santykis. Termoizoliacinio kompozito tūrį iki 93 % sudarė užpildai ir 7 % rišamoji medžiaga. Keičiant PSG užpildą į mišrų užpildą (PSG ir trupinta EPS atlieka) ir PC kiekiui esant 70, 100 ir 130 kg/m³, tankį atitinkamai pavyko sumažinti 8, 7 ir 8%. Tai lėmė labai mažas trupintų polistireninio putplasčio atliekų tankis – ~15 kg/m³. Mažiausio tankio stambiausios frakcijos PSG sudaro 3/5 bandinio tūrio, didžiausio tankio iki 2 mm frakcijos PSG užpildė tuštumas tarp stambių granulių ir sutankino kompozito struktūrą nedidindamos jo tūrio. Siekiant sumažinti termoizoliacinio kompozito tankį, smulkios frakcijos PSG buvo keičiamos trupinta EPS atlieka.



3.21 pav. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais tankio priklausomybė nuo rišamosios medžiagos kiekio: 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

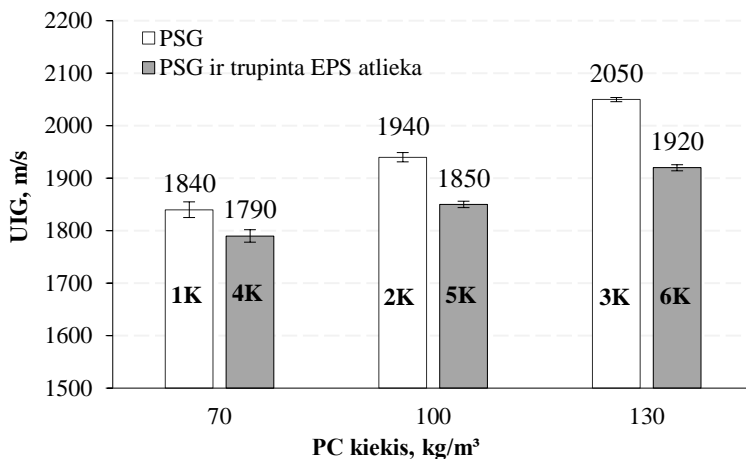
Fig. 3.21. Influence of the amount of binding material on density of thermal insulation composite with lightweight aggregates: 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

Tyrimų rezultatų duomenys parodė, kad naudojant PSG užpildą kompozito tankis priklausomai nuo cementinės matricos kiekio kito 247–335 kg/m³ ribose,

o naudojant PSG ir trupintą EPS atlieką termoizoliacinio kompozito tankis sumažėjo ir kinta priklausomai nuo cementinės matricos kiekio 227–309 kg/m³ ribose.

3.3.5. Ultragarso impulso sklidimo greitis termoizoliaciniame kompozite

Termoizoliacinio kompozito struktūros pokyčiai buvo nustatyti ultragarso impulso sklidimo greičio tyrimu. 3.22 paveiksle pateikti ultragarso sklidimo greičio termoizoliacinio kompozito su PSG bei PSG ir trupintų EPS atliekų užpildais nustatymo rezultatai. Atlikti bandinių matavimai rodo, kad mažiausias ultragarso greitis gautas mažo tankio bandiniuose. Tai matome 3.22 paveikslo 4K sudėties stulpelyje, kurio vertė yra 1793 m/s. Didėjant bandinių tankiui, ultragarso sklidimo greitis didėja ir tankiausiame kompozite – bandinyje 3K – pasiekia 2052 m/s greitį. Ultragarso sklidimo greitis priklauso nuo medžiagos tankio ir jos standumo. Kietuose kūnuose ultragarso greitis yra didžiausias ir ultragarsas sklinda greičiausiai, o ore – lėčiausiai. Termoizoliacinių kompozitų tankis yra nedidelis, jų sudėtiniai komponentai – užpildai ir matrica – yra porėti. Didžiausią dalį bandinių tūrio sudaro uždarnos ir susisiekiančios poros užpildo granulėse bei matricoje ir tuštumos tarp jų. Šios erdvės yra pilnos oro. Kompozitų tankį lemia matricos cemento akmens kiekis ir užpildo granulių kietoji masė.

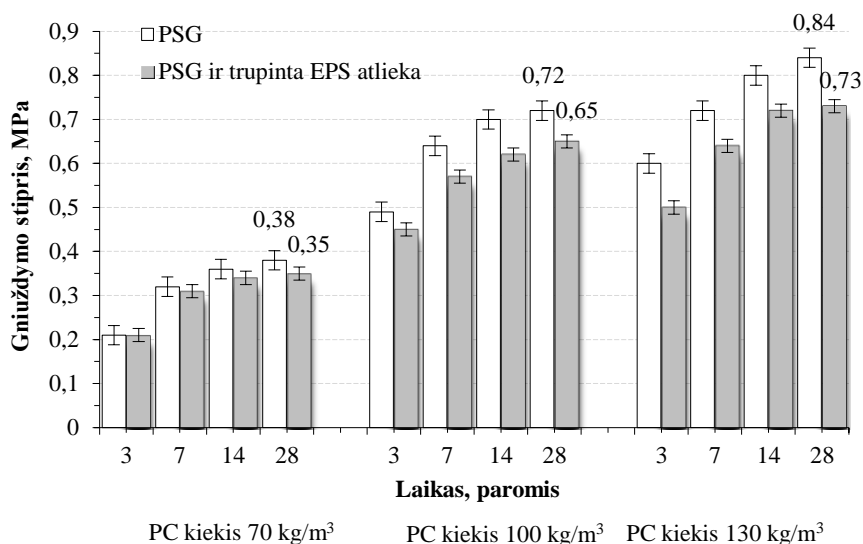


3.22. pav. UIG bandiniuose su skirtingu kiekiu rišamosios medžiagos ir skirtingais užpildais: 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

Fig. 3.22. UVP in the samples with different amount of binding materials and different aggregates: 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

3.3.6. Gniuždymo stipris

Palyginti su konstrukcinėmis medžiagomis, termoizoliacinių medžiagų gniuždymo stipris yra nedidelis. Termoizoliacinės medžiagos naudojamos pastatų atitvarose, kurių neveikia didelės apkrovos. Atsižvelgiant į termoizoliacinių medžiagų panaudojimo atitvarų konstrukcijose variantą, šios medžiagos turi atlaikyti savo svorio apkrovą, yra save laikančios vertikaliuose atitvarų konstrukcijose arba atlaikančios sąlyginai nedideles apkrovas šiltinant jomis horizontalias (grindų, stogo) konstrukcijas. Pagrindinis veiksnys, kuris lemia mažo tankio ($227\text{--}300\text{ kg/m}^3$) su porėtais užpildais gniuždymo stiprio vertę, yra sutankinta kompozito struktūra, užtikrinanti užpildo granulių tarpusavio kontaktą lietimosi taškuose su cementine matrica. Termoizoliacinio kompozito su skirtingais lengvaisiais užpildais gniuždymo stiprio rezultatai pateikti 3.23 paveiksle.



3.23 pav. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais gniuždymo stiprio priklausomybė nuo rišamosios medžiagos kiekio: 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

Fig. 3.23. Influence of the amount of binding material on compressive strength of thermal insulation composite with lightweight aggregates: 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

Rezultatų analizė rodo, kad paruošto kompozito su lengvaisiais užpildais gniuždymo stipris greičiausiai didėja per pirmąsias tris paras, o po 7 parų stiprio didėjimo intensyvumas iki 28 parų yra pastovus ir nedidelis. Vis dėlto, lyginami rezultatus po 28 parų, matome, kad didžiausią poveikį gniuždymo stipriui daro cemento akmens kiekis bandiniuose. Cemento kiekiui kintant nuo 70 iki

130 kg/m³, gniuždymo stipris po 28 parų padidėja daugiau nei du kartus, kad ir kokie užpildai būtų naudojami. Tai reiškia, kad didesnis kiekis cemento užtikrina geresnes kontaktines zonas tarp granulių ir cementinės matricos bei leidžia sukurti stipresnę karkasą. Skirtingų užpildų naudojimas didelės įtakos gniuždymo stipriui neturi. Kai naudojamas tik 70 kg/m³ cemento kiekis gniuždymo stiprio skirtumas tarp skirtingų užpildų sudaro apie 10 %, o naudojant 100 kg/m³ – apie 8 %, 130 kg/m³ – apie 13 %.

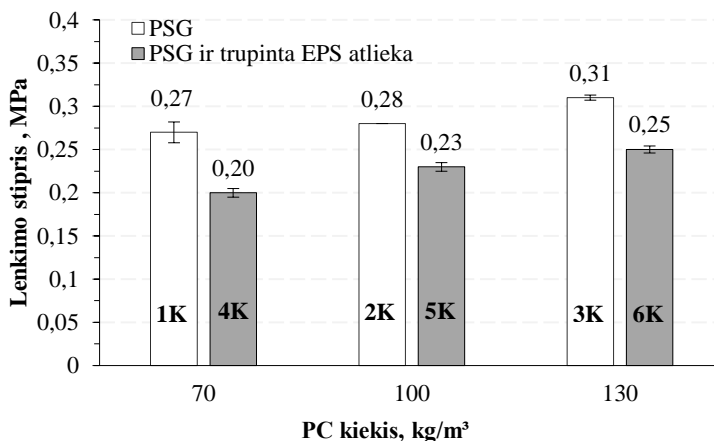
Visais atvejais kompozito su mišriu užpildu gniuždymo stipris yra mažesnis. Galima teigti, kad, esant nepakankamam kompozito komponentų sutankinimui, gniuždymo proceso metu irimas vyksta per silpniausias jungtis, t. y. per trupinto polistireninio putplasčio atliekas. Kitų autorių darbuose (Lo *et al.* 2007; Yu *et al.* 2013) taip pat patvirtinama, kad užpildai yra silpniausia kompozito grandis, per kurią vyksta irimas.

3.3.7. Lenkimo stipris

Transportuojant, montuojant ar sandėliuojant yra svarbus medžiagos ar gaminio lenkimo stiprio rodiklis. Eksploatacijos metu termoizoliacinių medžiagų lenkimo stipris didesnio poveikio atitvarinių konstrukcijų bendram darbui dažniausiai neturi. 3.24 paveiksle pateikti sukurto kompozito su PSG bei PSG su trupintomis EPS atliekomis po 28 parų kietinimo lenkimo stiprio rezultatai.

Lyginant termoizoliacinio kompozito bandinių lenkimo stiprį su gniuždymo stipriu, galima matyti, kad kai PC kiekis mažiausias (70 kg/m³), lenkimo stiprio vertės yra apie du kartus mažesnės nei gniuždymo stiprio vertės.

Darbe analizuotas PC kiekio ir naudotų užpildų poveikis lenkimo stipriui. Kaip rodo tyrimų rezultatai, PC kiekiui kintant nuo 70 iki 130 kg/m³, t. y. beveik du kartus, lenkimo stipris kinta labai nedaug. Pirmuoju atveju, kaip užpildą naudojant tik PSG, šis skirtumas yra mažesnis nei 15 %, lyginant bandinius, į kuriuos dėta 70 kg/m³ PC ir 130 kg/m³ PC. Antruoju atveju, kai PSG naudojamos kartu su trupinta EPS atlieka, šis skirtumas siekia ~25 %. Visais atvejais kompozito su EPS atliekomis lenkimo stipris mažesnis nei kompozito vien tik su PSG. Šis skirtumas, kai PC kiekis yra 70 kg/m³, sudaro ~35 %, kai 100 kg/m³ PC – beveik 22 % ir kai 130 kg/m³ PC ~24 %. Tai rodo, kad, naudojant mažesnę PC, kiekį labai aktualios yra užpildo sudėtis ir savybės. Kai naudojamas silpnas užpildas ir mažas PC kiekis, lenkimo apkrovų metu užpildas perima didesnę kiekį apkrovų, o didinant PC kiekį, užpildas turi mažesnę poveikį kompozito lenkimo stipriui, nes didesnę dalį lenkimo apkrovų perima rišamoji medžiaga.



3.24 pav. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais lenkimo stiprio priklausomybė nuo rišamosios medžiagos kiekio: 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

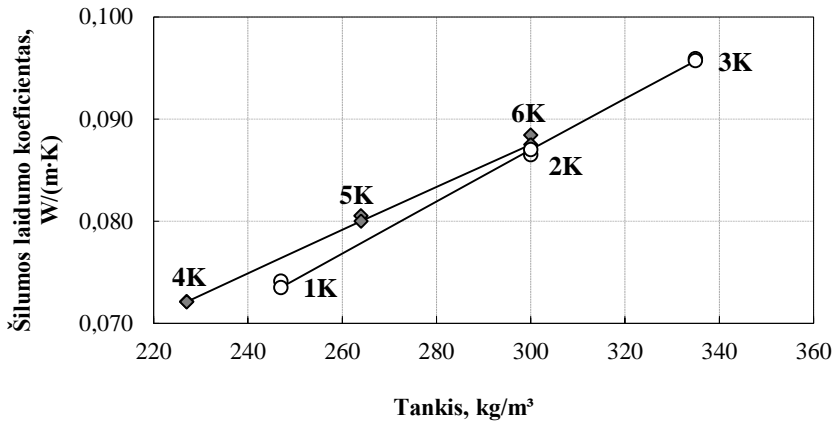
Fig. 3.24. Influence of the amount of binding material on bending strength of thermal insulation composite with lightweight aggregates: 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

Panašūs rezultatai gauti ir kituose moksliniuose tyrimuose. Kligys (2009) atliko lengvojo betono su trupinta polistireninio putplasčio atlieka lenkimo stiprio tyrimus. Šio kompozito lenkimo stipris, esant rišamosios medžiagos kiekiui nuo 150 iki 350 kg/m³, kito nuo 0,09 iki 0,42 MPa.

Tyrimų rezultatai rodo, kad tirtų bandinių lenkimo stipris yra tik kelis kartus (iki 2,5 karto) mažesnis už gniuždymo stiprį. Tuo tarpu akytų betonų lenkimo stipris paprastai yra 3–5 kartus mažesnis už gniuždymo stiprį. Termoizoliacinių kompozitų su lengvaisiais užpildais, lenkimo stiprį didina modifikuotos matricos gera kontaktinės zonos jungtis su užpildo granulėmis.

3.3.8. Šilumos laidumas

Viena svarbiausių charakteristikų, apibūdinančių termoizoliacinės medžiagos eksploatacines charakteristikas, yra šilumos laidumo koeficientas arba šiluminė varža. Paprastai medžiagų šilumos laidumo koeficientas labiausiai priklauso nuo medžiagos tankio, struktūros, prigimties, matavimų temperatūros, drėgnio ir kt. Pirmieji du rodikliai daugiausia lemia medžiagos šilumos laidumą ir šilumos perdavimo būdus. 3.25 paveiksle pateikti termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais šilumos laidumo tyrimų rezultatai.



3.25 pav. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo medžiagos tankio: ♦ – su PSG ir trupinta EPS atlieka; ○ – su PSG, 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

Fig. 3.25. Dependence of the materials thermal conductivity on the thermal insulating composite density: ♦ – with CGB and cruched EPS waste; ○ – with CGB, 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

Kompozito tankis kito nuo 225 iki 335 kg/m³. Abiem atvejais, tiek naudojant kaip užpildą PSG, tiek PSG ir trupintas EPS atliekas, didėjant tankiui, vyko staigus šilumos laidumo koeficiento didėjimas. Kompozito su PSG ir trupintomis EPS atliekomis šilumos laidumas apie 3 % mažesnis, tačiau ir tankis mažesnis, lyginant kompozitą vien su PSG. Lyginant kompozitų šilumos laidumo koeficientų vertes, kai tankiai vienodi, matyti, kad mažesnių tankių intervale yra tik nedidelis skirtumas, o kai tankis didesnis, 300 kg/m³, rezultatai vienodi. Vieno- das rezultatų vertes, esant didesniems tankiams, lemia tai, kad kompozito tik su PSG granulėmis šilumos laidumo didėjimas intensyvesnis nei su PSG ir trupintomis EPS atliekomis. Abiem atvejais gautas priklausomybes galima aprašyti regresinėmis (3.17) ir (3.18) lygtimis.

Lengvojo betono su PSG užpildu (1K, 2K ir 3K sudėtys), lygtis yra:

$$\lambda_{10} = 0,0228 + 0,0001 \cdot \rho, \text{ W/(m} \cdot \text{K)}, \quad (3.17)$$

kai $R^2 = 0,997$ ir $S_R = 0,000369$;

Lengvojo betono su mišriu užpildu (4K, 5K ir 6K sudėtys), lygtis yra:

$$\lambda_{10} = 0,00641 + 0,00027 \cdot \rho, \text{ W/(m} \cdot \text{K)}, \quad (3.18)$$

kai $R^2 = 0,995$ ir $S_r = 0,000818$;

čia λ_{10} – bandinio šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); ρ – bandinio tankis, kg/m³; R^2 – determinacijos koeficientas; S_r – standartinis nuokrypis.

Determinacijos koeficientas kintantis nuo 0,997 iki 0,995 rodo, kad termoizoliacinio kompozito šilumos laidumo koeficiento vertės apie 99 % priklauso nuo termoizoliacinio kompozito tankio.

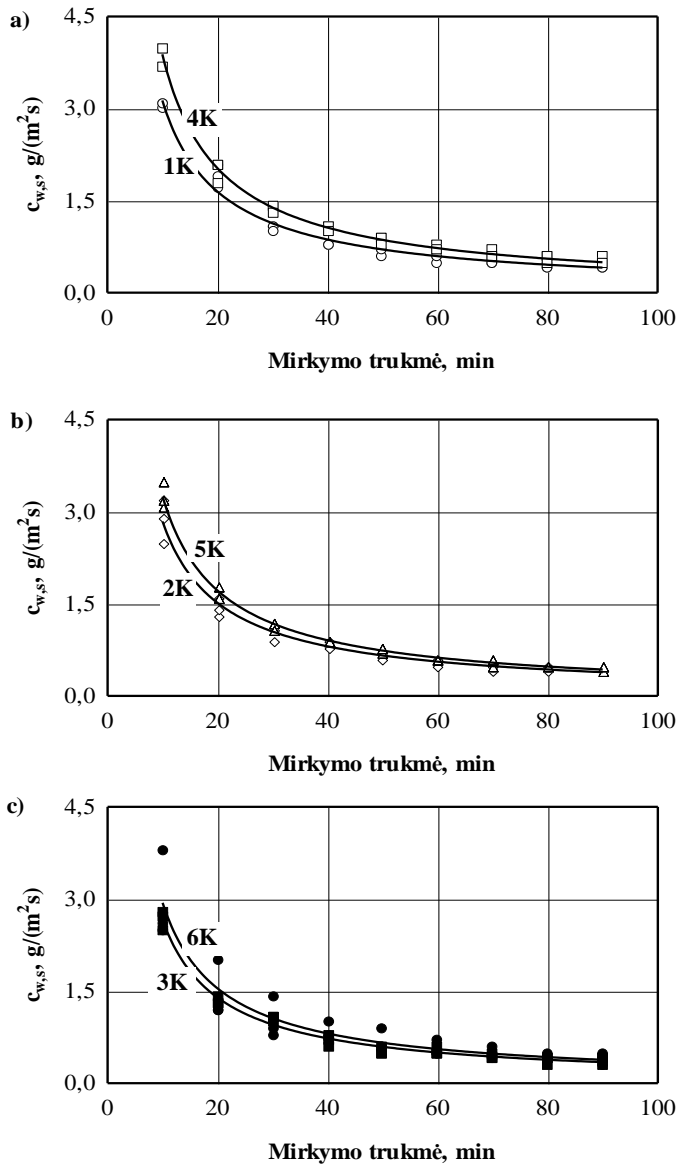
Kitų autorių darbuose (Liu *et al.* 2010; Gu *et al.* 1997; Uysal *et al.* 2004) pažymima, kad didinant cemento kiekį, didėja medžiagų šilumos laidumas. Autorius (Khan 2002) pažymi, kad mažesnę medžiagos tankį ir šilumos laidumą leidžia gauti didesnis porų kiekis. Autorius (Balčiūnas 2015) nurodo, kad mažesnės poros užtikrina mažesnę šilumos laidumą dėl lėtesnio šilumos perdavimo dujomis (oru), o mažesnis kontaktinių zonų kiekis sumažina šilumos perdavimą kietuoju karkasu, šis teiginys galioja ir mūsų atveju.

Tyrimų analizė rodo, kad pakeičiant smulkiausią PSG frakciją trupinto EPS atliekų užpildu galime sumažinti šilumos laidumo koeficientą. Esant mažiausiam 70 kg/m³ cementinės matricos kiekiui, nuo 0,0740 iki 0,0720 W/(m·K), esant 100 kg/m³ nuo 0,0865 iki 0,0800 W/(m·K) ir kai naudojamas didžiausias 130 kg/m³ cementinės matricos kiekis, nuo 0,0977 iki 0,0876 W/(m·K).

3.3.9. Kapiliarinė vandens įgertis

Dauguma statybinių medžiagų kontaktuodamos su vandeniu, jį sugeria. Vandens įgerties intensyvumas ir dydis priklauso nuo daugelio medžiagos rodiklių. Statybinių medžiagų vandens įgerties intensyvumą apibūdina kapiliarinio vandens įgerties koeficientas. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais kapiliarinio vandens įgerties rezultatai pateikti 3.26 paveiksle. Kaip matyti iš šio paveikslo a, b, c dalių, visais atvejais būdingas staigus vandens įgerties intensyvumo mažėjimas, kuris trunka 20–30 min. Vėliau įgerties procesas išlieka panašus visuose kompozituose – per likusias 60 min įgėrio intensyvumas sumažėja du kartus, t. y. nuo ~1 iki ~0,5 g/m²s. Reikia atkreipti dėmesį, kad 3.26 paveiksle, a, pateiktos kreivės pradiniam kapiliarinio vandens įgerties etape rodo šiek tiek didesnes įgerties vertes. Tai ypač aiškiai matyti, kai betonas naudojamas su mišriu užpildu, t. y. su PSG ir trupintomis EPS atliekomis.

Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais kapiliarinio vandens įgėrio rezultatai rodo, kad kapiliarinio vandens įgėrio vertės yra nedidelės. Šiuos pokyčius galima paaiškinti tuo, kad pradiniam brinkimo etape, kai porėtos matricos ir užpildų paviršiai liečiasi su vandeniu, yra užpildomos kompozito tuštumos. Tolesnį vandens prasiskverbimą į gilesnius kompozito sluoksnius apsunkina kliūtys vandens tekėjimo kelyje. Vandens judėjimas kapiliarinėmis jungtimis, tiek matricoje, tiek užpildų granulėse, apsunkinamas dėl vidinio oro garų slėgio. Vidinių garų susidarymas trukdo intensyvesniam vandens įgėriui.



3.26 pav. Termoizoliacinio kompozito kapiliarinio vandens įgėrio koeficiento priklausomybė nuo mirkymo trukmės, kai PC kiekis: a) – 70 kg/m³, b) – 100 kg/m³, c) – 130 kg/m³. 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

Fig. 3.26. Dependence of thermal insulation composite capillary coefficient on the immersion duration when amount of PC: a) – PC 70 kg/m³, b) – 100 kg/m³, c) – 130 kg/m³. 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

Termoizoliacinio kompozito kapiliarinio vandens įgėrio priklausomybė nuo mirkymo trukmės, aprašyta regresinėmis lygtimis: 1K sudėties – (3.19), 4K sudėties – (3.20), 2K sudėties – (3.21), 5K sudėties – (3.22), 3K sudėties – (3.23), 6K sudėties – (3.24).

$$c_{w,s1K} = 1174,34 \cdot t^{-0,926}, \quad (3.19)$$

kai $R^2 = 0,991$ ir $S_R = 0,119$;

$$c_{w,s4K} = 1545,18 \cdot t^{-0,936}, \quad (3.20)$$

kai $R^2 = 0,997$ ir $S_R = 0,084$;

$$c_{w,s2K} = 939,09 \cdot t^{-0,907}, \quad (3.21)$$

kai $R^2 = 0,987$ ir $S_R = 0,125$;

$$c_{w,s5K} = 1167,55 \cdot t^{-0,920}, \quad (3.22)$$

kai $R^2 = 0,996$ ir $S_R = 0,080$;

$$c_{w,s3K} = 1027,71 \cdot t^{-0,931}, \quad (3.23)$$

kai $R^2 = 0,993$ ir $S_R = 0,085$;

$$c_{w,s6K} = 1115,24 \cdot t^{-0,928}, \quad (3.24)$$

kai $R^2 = 0,945$ ir $S_R = 0,275$;

čia $c_{w,s}$ – kapiliarinis vandens įgėrio koeficientas, g/(m²s); t – mirkymo trukmė, s; R^2 – determinacijos koeficientas; S_R – standartinis nuokrypis.

Determinacijos koeficientas kintantis nuo 0,945 iki 0,997 rodo, kad kartojant bandymą kompozito kapiliarinio vandens įgėrio koeficiento vertės gali tik apie 5 % nukrypti nuo šių reikšmių.

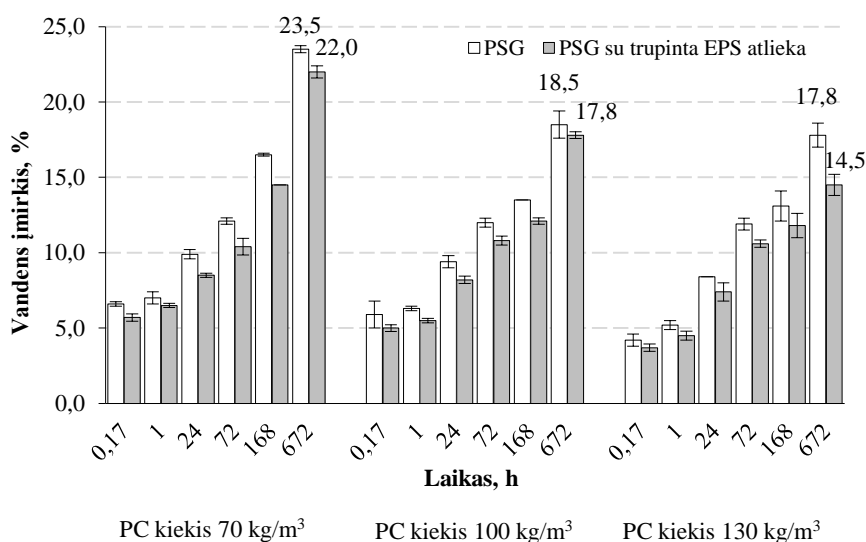
Kitų autorių (Sinica *et al.* 2008) darbuose gauti panašūs rezultatai – 150–350 kg/m³ tankio lengvojo betono su EPS atliekomis kapiliarinis įmirkis kito nuo 1,5 iki 0,47 g/m²s, o didesnio tankio kompozitų (UAB – „Aeroc“) – 425, 375 ir 300 kg/m³ tankio – kapiliarinis įmirkis atitinkamai kito 1,10; 1,04 ir 0,986 g/m²s.

Tyrimų rezultatų analizė rodo, kad termoizoliacinio kompozito bandinių kapiliarinis įgėris labiausiai priklauso nuo cementinės matricos naudojamo kiekio. Kompozituose naudojant mažiausią cementinės matricos kiekį 70 kg/m³ gaunamos didžiausios kapiliarinio įgėrio vertės nuo 4 iki 3 g/m²s, mažiausias cementi-

nės matricos kiekis lėmė didesnę vandens sugerties reikšmę, dėl didesnio kiekio neužpildytų tuštumų tarp lengvųjų užpildų.

3.3.10. Ilgalaikis vandens įmirkis

Ilgą laiką veikiant krituliams ar gruntiniam vandeniui, statybinės medžiagos gali įmirkti. Termoizoliacinio sluoksnio ilgalaikis įmirkis vertinamas bandinius 28 paras išlaikius vandenyje visiškai panardinus. 3.27 paveiksle pateikti termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais bandinių ilgalaikio įmirkio vandenyje po 10 min, 1 val bei 1, 3, 7 ir 28 parų. Kaip rodo tyrimų rezultatai, didinant PC kiekį, kompozito įmirkis mažėja, kad ir koks būtų buvęs naudotas užpildas. Intensyviausias įmirkis vyksta per pirmąsias 10 min. Galime daryti prielaidą, kad pirmiausia ir greičiausiai užsipildo stambios poros, o vėliau vyksta lėtas smulkių porų užsipildymas. Kaip tik didesnis PC kiekis leidžia susidaryti didesniai skaičiui smulkių porų, kurios ir nulemia mažesnę įmirkį.



3.27 pav. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais vandens įmirkio priklausomybė nuo cemento kiekio: 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

Fig. 3.27. Dependence of water absorption of thermal insulation composite with lightweight aggregates on the amount of cement: 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

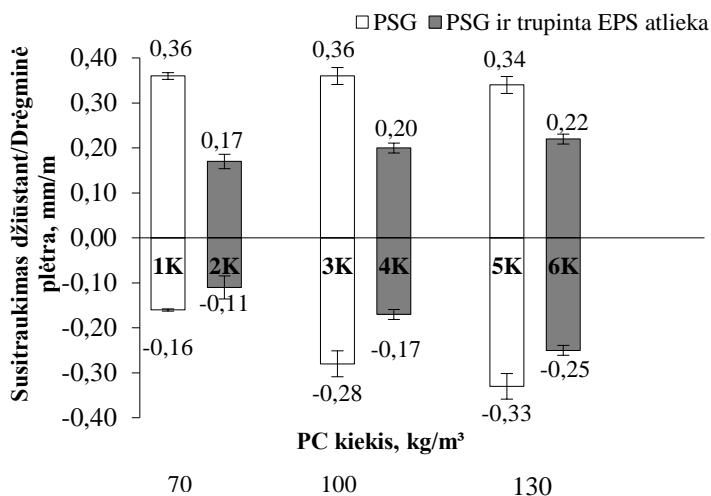
Užpildai taip pat turi nemažą poveikį ilgalaikio įmirkio rezultatams. Naudojant 70 ir 100 kg/m^3 PC, su PSG ir trupinta EPS atlieka betono įmirkis yra

~14 % mažesnis nei užpildu naudojant tik PSG, o kai PC yra 130 kg/m^3 , skirtumas sudaro ~18 %. Kaip buvo rašyta apie užpildų tyrimus anksčiau, PSG įmirkis yra gerokai didesnis nei trupintų EPS atliekų, nes putplasčio atlieka pasižymi uždara porų struktūra, o tai ir lemia mažesnę betono įmirkį naudojant mišrų užpildą.

Atlikti tyrimai parodė, kad didinant PC nuo 70 iki 130 kg/m^3 ir panaudojant trupintą EPS atlieką galima sumažinti termoizoliacinio kompozito įmirkį iki 18 %.

3.3.11. Drėgmės deformacijos

Eksplotacijos metu statybinės medžiagos esant didesniai santykiniai oro drėgmei sudrėksta, o sausuojant laikotarpiu – išdžiūsta. Vykstant drėgmės sorbcijos ir desorbcijos procesams, dauguma medžiagų plečiasi sugerdamos iš aplinkos oro drėgmę ir traukiasi džiūdamos. Toks medžiagų matmenų pokytis gali sukelti konstrukcijų pažeidimus ar suirimą. 3.28 paveiksle pateikti kompozito su lengvaisiais užpildais tyrimų rezultatai.



3.28 pav. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais drėgminių deformacijų priklausomybė nuo cemento kiekio: 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

Fig. 3.28. Dependence of moisture movement of thermal insulation composite with lightweight aggregates on amount of cement: 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

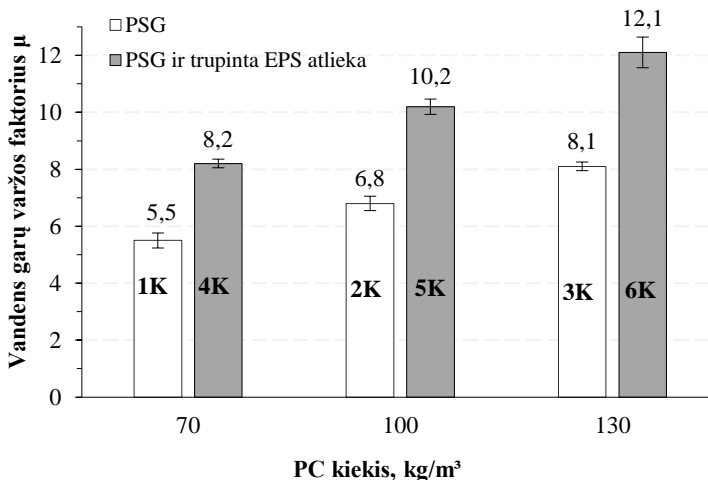
Kligys (2009) atliko lengvojo betono su polistireninio putplasčio atliekų užpildu susitraukimų tyrimus. Darbe teigiama, kad susitraukimams didžiausią poveikį daro kompozicinės medžiagos bandinio tūryje esantis tarpų kiekis ir tuštumų pobūdis. Drėgmė kaupiasi tarp tarpų esančiose susisiekiančiose matricos neužpildytose tuštumose. Dėl didelio tarpų kiekio bandinio tūryje juos dengiančios matricos sienelės yra labai plonos, jose nėra didesnio skersmens oro tuštumų. Matricoje kaupiasi tik nedidelis drėgmės kiekis, palyginti su kiekiu, esančiu visame kompozicinės medžiagos bandinio tūryje. Bandiniai džiūdami traukiasi dėl drėgmės migracijos iš minėtų tuštumų.

Taigi, atlikti tyrimai parodė, kad panaudojant trupintą EPS atlieką yra sumažinamas termoizoliacinio kompozito susitraukimas ir plėtra, ypač esant mažiausiam PC kiekiui – 70 kg/m^3 .

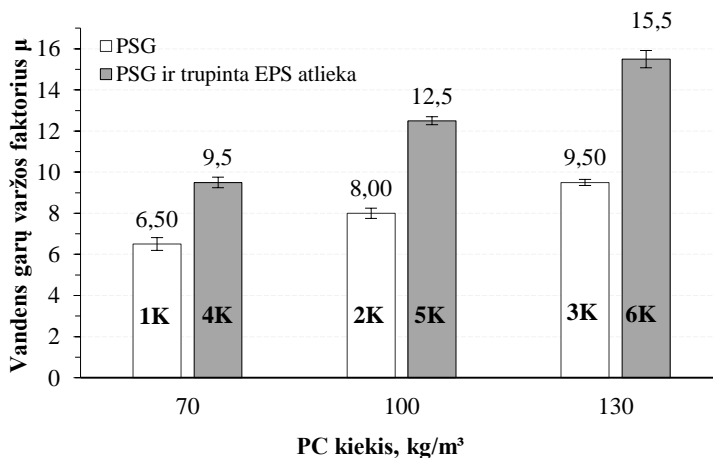
3.3.12. Pralaidumas vandens garams

Skaičiuojant pastatų atitvarų temperatūros drėgmės režimą, būtina žinoti atitvaros sluoksnių vandens garų pralaidumą. Statybinių medžiagų vandens garų laidumas dažniausiai įvertinamas vandens garų varžos faktoriumi μ . Medžiagų garų laidumas priklauso ne tik nuo pačių medžiagų charakteristikų, bet ir nuo bandymo sąlygų, o bandymo sąlygos parenkamos atsižvelgiant į medžiagos eksploataavimo sąlygas. 3.29 paveiksle pateikti sausomis ir drėgnomis sąlygomis gauti vandens garų laidumo rezultatai.

a)



b)



3.29 pav. Termoizoliacinio kompozito su lengvaisiais užpildais vandens garų varžos faktoriaus priklausomybė nuo cemento kiekio: a) – bandymo sąlygos 23-0/50; b) – bandymo sąlygos 23-50/93: 1K–6K – kompozito sudėties numeriai (2.5 lentelė)

Fig. 3.29. Dependence of water vapour resistance of thermal insulation composite with lightweight aggregates on the amount of cement: a) – test conditions 23-0/50; b) – test conditions 23-50/93: 1K–6K – designation of composite composition (Table 2.5)

Lygindami sausomis ir drėgnomis sąlygomis nustatytą vandens garų varžos faktorių matome, kad sausomis sąlygomis bandiniai geriau praleidžia vandens garus visais atvejais – ir esant skirtingam cemento kiekiui ir esant skirtingiems užpildams. Vandens garų migracija vyksta per termoizoliacinio kompozito matricą ir PSG nugalėdama kelyje sutiktą kieto porėto kūno pasipriešinimą bei uždaras ir tarpusavyje susisiekiančias oro tuštumas. Kaip buvo nustatyta 3.2.11 poskyryje, didėjant drėgniui, vyksta medžiagos matmenų plėtra. Kaip žinoma, deformacijos pirmiausia vyksta ta kryptimi, kur daugiausia laisvos vietos. Šiuo atveju, vykstant medžiagos matmenų plėtrai, pirmiausia mažėja tarpai tarp dalelių, o per mažesnius tarpus lėtėja garų srautas.

Didinant PC kiekį, laidumas vandens garams mažėja, nes didėja matricos kiekis, kompozito tankis, o kartu susidaro tankesnė struktūra. Mažėjant tuštumų – oro tarpų tarp užpildo ir matricos, – per kurias ir vyksta lėtesnė garų migracija.

Kai užpildas mišrus garų laidumas yra gerokai mažesnis. Kadangi trupintos EPS atliekos struktūra yra uždaporė, be to, gerai užpildo smulkius tarpus tarp stambių PSG, tai kompozito struktūroje lieka mažai didesnių tuštumų, per kurias lengvai vyktų garų perdavimas.

Pralaidumo vandens garams tyrimai rodo, kad pastatų atitvarų konstrukcijose naudojant termoizoliacinius kompozitus su PSG ir su PSG ir trupintos EPS atliekos užpildu su mažiausiu 70 kg/m^3 rišamosios medžiagos kiekiu užtikrinamas nedidelis (5–7) vandens garų varžos faktorius. Vandens garai susikaupę patalpose gali laisvai migruoti į išorę ir užtikrinti gerą patalpų mikroklimatą.

3.3.13. Eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal struktūros rodiklius

Kompozitinių bandinių su PSG užpildu ir kompozitinių bandinių su PSG ir trupintos EPS aliekos užpildu nustatytos vidutinės struktūrinių rodiklių vertės pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Vidutinės kompozicinių bandinių struktūrinių rodiklių ir apskaičiuoto eksploatacinio atsparumo šalčiui vertės

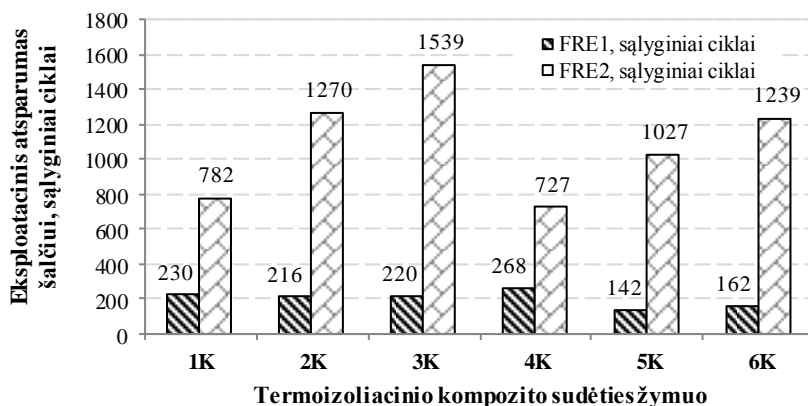
Table 3.2. Composite samples of medium structural indicators and the estimated value of frost resistance

Partijos Nr.	$W_E, \%$	$W_R, \%$	$R, \%$	$D, \%$	$G_1, \text{g/cm}^2$	$G_2, \text{g/cm}^2$	$N, \text{šal. vnt.}$	$g_2, \text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$	Eksploatacinis atsparumas šalčiui, sąlyginiai ciklai	
									F_{RE1}	F_{RE2}
Bandiniai su PSG užpildu										
1K	10,7	25,1	57,2	3,0	0,89	0,93	1,4	0,21	230	782
2K	10,7	41,1	74,0	1,4	1,64	1,67	0,5	0,27	216	1270
3K	10,8	43,6	75,2	1,3	2,26	1,89	0,7	0,25	220	1539
Bandiniai su PSG ir trupintos EPS atliekos užpildu										
4K	8,8	23,7	63,0	3,2	0,80	0,73	0,5	0,26	268	727
5K	12,2	46,4	73,8	1,2	2,08	2,09	0,9	0,33	142	1027
6K	8,8	45,0	80,5	1,2	1,28	1,65	1,5	0,21	162	1239

Kompozitinių bandinių su PSG užpildu nustatytos vidutinės struktūrinių rodiklių vertės kinta taip (3.2 lentelė): efektyvusis poringumas 10,7–10,8 %, bendrasis poringumas 25,1–43,6 %, poringos erdvės rezervas 57,2–75,2 %, sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis 1,3–3,0 %, kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptimi 0,89–2,26 g/cm², kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi 0,93–1,89 g/cm², struktūros nevienalytiškumo laipsnis 0,5–1,4 sąl. vnt., kapiliarinis masės srauto greitis šaldymo kryptimi 0,21–0,27 g/cm².

Kompozicinių bandinių su PSG ir trupintos EPS atliekos užpildu nustatytos vidutinės struktūrinių rodiklių vertės kinta taip (3.2 lentelė): efektyvusis poringumas 8,8–12,2 %, bendrasis poringumas 23,7–46,4 %, poringos erdvės rezervas 63,0–80,5 %, sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis 1,2–3,2 %, kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptimi 0,80–2,08 g/cm², kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi 0,73–2,09 g/cm², struktūros nevienalytiškumo laipsnis 0,5–1,5 sąl. vnt., kapiliarinis masės srauto greitis šaldymo kryptimi 0,21–0,33 g/cm².

Apskaičiuoto bandinių su PSG užpildu eksploatacinio atsparumo šalčiui vertės F_{RE1} kinta nuo 216 iki 230 sąl. ciklų, F_{RE2} kinta nuo 782 iki 1539 sąl. ciklų. Bandinių su PSG ir trupintos EPS atliekos užpildu, eksploatacinio atsparumo šalčiui vertės F_{RE1} kinta nuo 142 iki 268 sąl. ciklų, F_{RE2} kinta nuo 727 iki 1239 sąl. ciklų (3.30 pav.).



3.30 pav. Prognozuojamos eksploatacinio atsparumo šalčiui suirimo pradžios ir suirimo pabaigos sąlyginių ciklų vertės: 1K–6K – kompozto sudėties numeris (2.5 lentelė)

Fig. 3.30. Predicted values of the relative cycles of operational resistance to frost of start and end of fracture: 1K–6K – composite composition number (Table 2.5)

Analizuodami eksploatacinio atsparumo šalčiui vertes, apskaičiuotas pagal metodiką, pritaikytą prognozuoti poringų statybinių medžiagų atsparumą šalčiui vienpusiu būdu (Mačiulaitis 1996; Mačiulaitis 1997), matome, kad kompozitai su naudotais įvairiais priedais ir užpildais, netgi neatsižvelgiant į sudėtis, turi gana didelį ilgalaikiškumo potencialą vertinant vienpusio atsparumo šalčiui būdu. Autoriai (Vaičienė 2011), nagrinėję aktyviųjų priedų (nemalto katalizatoriaus atliekos iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus ir nedegtos mulitinės vatos) poveikį keramzitbetonio struktūrai ir savybėms, nustatė, kad tokia poringa konstrukcinė termoizoliacinė medžiaga, tinkama naudoti agresyviomis Lietuvos klimato sąlygomis. Tokios medžiagos eksploatacinio atsparumo šalčiui vertės kito taip: 8–87 sąl. ciklai vertinant pagal suirimo pradžią ir 21–230 sąl. ciklai vertinant pagal suirimo pabaigą. Kompozicinių bandinių su PSG ir trupintos EPS atliekos užpildu eksploatacinio atsparumo šalčiui mažiausia vertė F_{RE1} yra 142 sąl. ciklai, o didžiausia F_{RE2} yra 1539 sąl. ciklai. Manome, kad didesnę ilgalaikiškumo potencialą lemia susidariusi bandinių porėta makrostruktūra. Poringos erdvės rezervas, kuris nusako rezervinių porų ir kapiliarų kiekį, kuriuo labai sunkiai įsiskverbia vanduo ar plastiškas ledas, bet ciklinio šaldymo ir atšildymo metu jie pamažu užsipildo, kinta nuo 57,2 iki 80,5 %, efektyvusis poringumas, kuris apibūdina bandinio efektyvųjų porų ir kapiliarų potencialą, t. y. tas poras ir kapiliarus, kurie lengvai užsipildo vandeniu, kinta nuo 8,8 iki 12,2 %, o bendrasis atviro poringumo rodiklis, kuris charakterizuoja visą atvirą susisiekiančią kompozicinio bandinio poringąją erdvę, kinta nuo 23,7 iki 46,4 %.

Medžiagų, kurios tinka naudoti neapsaugotos tiesiogiai veikiant agresyvioms aplinkos sąlygoms, charakterizuojamų didelėmis poringos erdvės rezervo vertėmis (54–71 %), tačiau mažomis efektyvaus poringumo vertėmis (2–3 %) ir bendrojo atviro poringumo vertėmis (5–9 %), prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui kinta nuo 722 iki 1263 sąl. ciklų. Taip pat teigiama, kad atskirų sudėčių suirimo pradžios ir pabaigos vertės yra artimi dydžiai, besiskiriantys siauru intervalu (Kizinievič 2009). Todėl, vertinant kompozito bandinių, kuriuose yra tokių medžiagų, ilgalaikiškumo potencialą, nepaisant didelių poringos erdvės rezervo verčių ir didelio prognozuojamo eksploatacinio atsparumo šalčiui pagal suirimo pabaigą, bet atsižvelgus į didesnes efektyviojo poringumo, bendrojo atviro poringumo vertes ir platų atskirų sudėčių suirimo pradžios ir pabaigos verčių intervalą, galima teigti, kad tokie kompoziciniai dirbiniai (1K–6K) gali būti naudojami vidutiniškai agresyviomis aplinkos sąlygomis, t. y. konstrukcijose, apsaugotose nuo tiesioginio aplinkos poveikio.

3.3.14. Tiesioginiai atsparumo šalčiui tyrimai

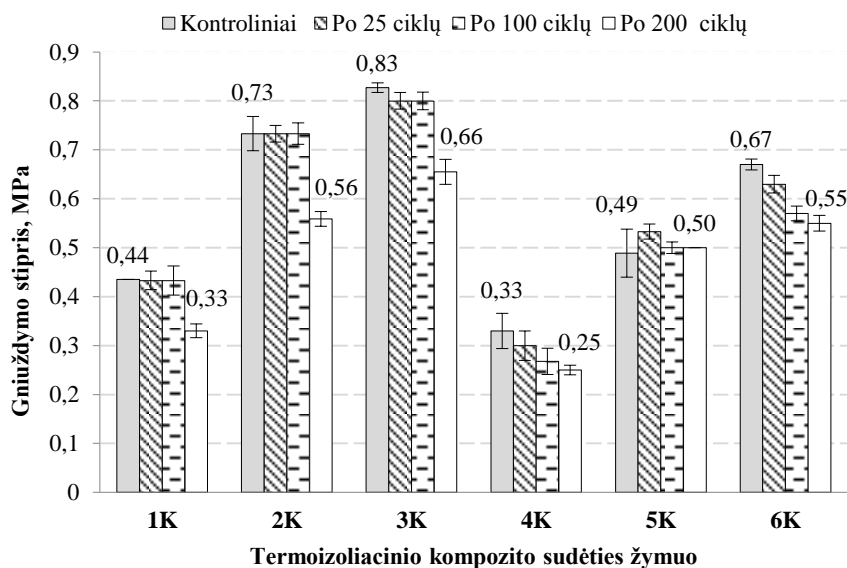
Termoizoliacinio kompozito bandinių atsparumas šalčiui buvo vertinamas pagal jų gniuždymo stiprio pokyčius, lyginant kontrolinių bandinių ir bandinių, kurie

buvo šaldomi ir atšildomi 25, 100 ir 200 ciklus tūrinio šaldymo ir atšildymo būdu pagal LST L 1428.17 metodiką, gniuždymo stiprį.

Nustatytas kontrolinių bandinių ir po 25, 100 ir 200 šaldymo ir atšildymo ciklų poveikio gniuždomasis stipris pateiktas 3.31 paveiksle, o apskaičiuoti gniuždomojo stiprio pokyčiai pateikti 3.3 lentelėje.

Vertindami gautus rezultatus, matome (3.31 paveikslas, 3.3 lentelė), kad bandinių, su PSG užpildu gniuždomojo stiprio po 25 ir 100 šaldymo ir atšildymo ciklų sumažėjimas vienodas ir nedidelis, Δf vertės svyruoja nuo 0 iki 3,6 %. O štai bandinių gniuždomojo stiprio po 200 šaldymo ir atšildymo ciklų sumažėjimas didelis, Δf vertės svyruoja nuo 20,5 iki 25,0 %.

Bandinių, su PSG ir trupintų EPS atliekų užpildu gniuždymo stiprio po 25 šaldymo ir atšildymo ciklų sumažėjimas didesnis, didžiausia Δf vertė siekia 9,1 %, po 100 šaldymo ir atšildymo ciklų, didžiausia Δf vertė siekia 18,2 %, po 200 šaldymo ir atšildymo ciklų, didžiausia Δf vertė siekia 24,2 %. 6K partijos bandinių, kuriuose yra didžiausias rišamosios medžiagos kiekis, gniuždymo stipris padidėja.



3.31 pav. Kontrolinių bandinių ir po 25, 100 ir 200 šaldymo ir atšildymo ciklų poveikio gniuždomasis stipris

Fig. 3.31. Effect on compressive strength of the control specimens and after 25, 100 and 200 cycles of freezing and thawing

3.3 lentelė. Gniuždymo stiprio pokyčiai po 25, 100 ir 200 šaldymo ir atšildymo ciklų
Table 3.3. Compressive strength changes after 25, 100 and 200 freezing and thawing cycles

Partijos Nr.	Gniuždymo stiprio pokytis Δf , %		
	Po 25 šaldymo ir atšildymo ciklų	Po 100 šaldymo ir atšildymo ciklų	Po 200 šaldymo ir atšildymo ciklų
Bandiniai su stiklo granulių priedu			
1K	2,3	2,3	25,0
2K	0,0	0,0	23,3
3K	3,6	3,6	20,5
Bandiniai su stiklo granulių ir trupinto EPS atliekų priedu			
4K	9,1	18,2	24,2
5K	6,0	14,9	17,9
6K	8,2	2,0	2,0

Autorius (Balčiūnas 2015) nustatė, kad kompozito blokėliai su cemento rišamąja medžiaga gali būti naudojami vidutiniškai agresyviomis aplinkos sąlygomis. Tokių blokelių vidutinis gniuždymo stipris sumažėjo 8,7 % po 25 šaldymo ir šaldymo ciklų pagal LST L 1428.17 „Betonas. Bandymo metodai. Atsparumo šalčiui nustatymas“.

Palyginus gautus rezultatus su atitvarinėms statybinėms medžiagoms keliamais atsparumo šalčiui reikalavimais ir atsižvelgus į panašių kompozicinių medžiagų funkcinę paskirtį, nors jos ir yra konstrukcijose veikiamos drėgmės bei šaldymo ir atšildymo kaitos, bet naudojamos konstrukcijose veiksmingai apsaugotos nuo tiesioginio klimato sąlygų poveikio, o tai gerokai padidina jų ilgalaikiškumą konstrukcijose, daroma išvada, kad tokių kompozitų bandiniai (1K–6K) gali būti traktuojami kaip atsparūs šalčiui vidutiniškai agresyviomis aplinkos sąlygomis, t. y. konstrukcijose, apsaugotose nuo tiesioginio aplinkos poveikio.

3.3.15. Degumas

Nedegumo bandymu pagal LST EN ISO 1182 buvo tikrinama ar gaminys tenkina A1 ir A2 degumo klasių keliamus reikalavimus. A1 degumo klasei priskiriamai nedegūs gaminiai. Ši klasė negali būti susieta su jokia kita klase. A2 degumo klasės gaminiai taip pat yra laikomi nedegiais, nes per juos nevyksta staigus liepsnos išplitimas. Klasės nuo A2 iki D yra papildomai žymimos pagal dūmų susidarymą indeksą s1, s2 ar s3 ir pagal liepsnojančių dalelių susidarymą d0, d1 ar d2 (pvz., A2-s1, d0).

Nedegumo bandymų rezultatai pateikiami 3.4 lentelėje. Pagal temperatūros didėjimo vertes bandinių masės nuostolius bei nenutrūkstamo liepsnojimo trukmę bandinių degumas buvo klasifikuojamas pagal LST EN 13501-1 standarto reikalavimus. Europos Komisijos sprendimu Nr. 96/603/EB, kai organinių medžiagų kiekis gaminyje yra mažesnis nei 1 % masės, jis automatiškai priskiriamas A1 degumo klasei. 1K, 2K ir 3K sudėčių bandiniai, neatliekant bandymų, buvo priskirti A1 degumo klasei, nes juose eksperimentiškai nustatyta organinių medžiagų kiekio vidutinė vertė buvo 0,41 %.

3.4 lentelė. Nedegumo metodu nustatyti bandymų rezultatai

Table 3.4. Test results of non-combustibility method

Kompozito sudėties Nr	Vidutinis bandinių tankis, kg/m ³	Vidutinis temperatūros padidėjimas, °C	Vidutinė nenutrūkstamo liepsnojimo trukmė, s	Vidutiniai bandinių masės nuostoliai, %
4K	230	62,3	19	4,3
5K	280	51,2	18	5,0
6K	310	61,5	19	3,4

4K, 5K ir 6K sudėčių bandiniai pasižymėjo nedideliais masės nuostoliais, temperatūros padidėjimas buvo didesnis nei 50 °C ir bandiniai palaikė liepsnojamą. A2 degumo klasei gali būti priskirti tik tokie bandiniai, kurių temperatūros didėjimas ne didesnis nei 50 °C, masės nuostoliai ne daugiau kaip 50 %, o liepsnojimo trukmė ne ilgesnė nei 20 s. 4, 5 ir 6 sudėčių bandiniai pagal keliamus reikalavimus masės nuostoliams ir liepsnojimo trukmei tenkina A2 degumo klasės reikalavimus, tačiau netenkina leistino temperatūrų padidėjimo reikalavimo. Papildomai buvo atlikti tyrimai pagal LST EN 13823 ir LST EN 1716. Pagal LST EN 13501-1 standarto reikalavimus A2 degumo klasei keliami šie reikalavimai: nėra šoninės liepsnos sklidimo (LFS), FIGRA (=FIGRA0,2MJ) ≤ 120 W/s, THR600s $\leq 7,5$ MJ.

Pagal LST EN 13823 metodiką bandymu yra įvertinamas gaminio įnašas į gaisro plėtimąsi, modeliuojant gaisro, sukkelto vieno degančio objekto, situaciją. Bandymas taikomas A2, B, C ir D degumo charakteristikos klasėms. Bandymų rezultatai pagal LST EN 13823 pateikti 3.5 lentelėje. Bandymų grafikai pateikti A priede. Kaip rodo bandymų rezultatai, šoninio liepsnos sklidimo bandymo metu nebuvo, gaisro didėjimo spartos rodiklis lygus nuliui, o suminis šilumos kiekis daugiau nei 10 kartų mažesnis už leistiną A2 degumo klasės medžiagoms.

3.5 lentelė. Reakcijos į ugnį tyrimų rezultatai**Table 3.5.** Test results of the reaction to fire

Bandinio tankis, kg/m ³	Šilumos išsiskyrimo greitis (HRR-vid), kW	Suminis šilumos kiekis (THR600s), MJ	Dumų susidarymo greitis (SPRvid), m ² /s,	Suminis dūmų kiekis (TSP600s), m ²	Dūmų susidarymo spartos rodiklis (SMOGRA), cm ² /s ²	Gaisro didėjimo spartos rodiklis (FIGRA (=FIGRA0,2MJ)), W/s.
230	29,9	0,5	0,037	34,2	0	0

Gauta vidutinė viršutinė šilumingumo vertė suminės degimo šilumos ir visuminės degimo šilumos nustatymo metu pagal LST EN ISO 1716 standarto reikalavimus buvo lygi 1,049 MJ/kg. Pagal LST EN 13501-1 standarto reikalavimus A2 klasės gaminių vidutinė viršutinė šilumingumo vertė turi būti mažesnė nei 3,0 MJ/kg.

Papildomai medžiagos vertintos pagal liepsnojančių lašelių ir dalelių kritimą ir pagal dūmų susidarymą. Kadangi nesusidarė liepsnojančių lašelių ir dalelių, tai medžiaga atitinka d0 poklasę, o pagal dūmų susidarymo indeksą nustatyta s1 poklasė. Taigi, 4K, 5K ir 6K sudėčių bandiniai atitinka A2-s1, d0 degumo klasę. Gauta produkto degumo klasę užtikrina deramą gaisrinės saugos lygį.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Cementinės matricos formavimo mišinių ir cemento akmenų savybių tyrimai rodo, kad daugelį cementinės matricos savybių galima reguliuoti, keičiant technologinius veiksnius t. y. maišymo trukmę ir naudojant įvairius modifikuojančius priedus (MKA, OII, SPL).

2. Nustatyta, kad modifikuojančių priedų naudojimas skirtingai veikia egzo reakcijos temperatūrą ir laiką. Naudojant OII su grynu PC ir kai 10 % PC keičiama MKA, egzo maksimumo pasiekimo laikas tik labai nedaug sulėtėjo, o temperatūra atvirkščiai – gryno PC su OII sumažėjo nuo 93,1 iki 75 °C, o kai 10 % PC keičiama MKA – iki 74,5 °C. SPL įmaiša lėtina cemento mineralų hidratacijos procesą. Esant sudėčiai iš gryno PC, mineralų hidratacijos egzo reakcijos maksimumas buvo pasiektas 960 min, o egzo maksimali temperatūra siekė 72 °C; esant sudėtyje PC ir 10 % MKA priedui, egzo maksimumo laikas ilgėja – reakcijos temperatūrai kritus iki 66,5 °C, egzo reakcijos maksimumas buvo pasiektas po 1060 min. Hidratacijos procesas labiausiai sulėtėjo, kai formavimo mišiniuose buvo panaudotos abi įmaišos, t. y. SP ir OII kartu. Šios įmaišos, kai formavimo mišinys iš gryno PC, pailgina cemento mineralų hidratacijos egzo maksimumą nuo 438 iki 1118 min, o temperatūrą sumažina nuo 93,1 iki 65,9 °C.

Kai cemento tešloje 10 % PC masės pakeičiama MKA priedu, egzo maksimumo temperatūra pailgėja nuo 522 iki 1170 min, o temperatūra sumažėja nuo 88,5 iki 59,5 °C.

3. Nustatyta, kad cemento tešlos tankis, kai kompleksiskai panaudoti visi trys matricą modifikuojantys priedai (MKA, OII ir SPL), sumažėjo nuo 2158 iki 714 kg/m³, priklausomai nuo maišymo trukmės, kuri buvo nuo 2 iki 10 min. Toks visų priedų panaudojimas leido sumažinti tankį 65 %, palyginti su gryno PC tešlos tankiu, gautu maišant mišinius 10 min.

4. OII įmaiša 36,1 % mažina cemento akmens tankį ir kartu 80 % gniuždymo stiprį po efektyviausio 5 min mišinio maišymo. MKA priedo sudėtyje yra aktyvaus SiO₂, kuris reaguoja su hidratacijos metu susidariusiu portlanditu (Ca(OH)₂), sudarydamas naujadarus – kalcio hidrosilikatų užuomazgas (CSH), kurie didina cemento akmens stiprumą. Porėto betono stiprumą 10 % padidina SPL įmaiša. Savo poveikiu, esant mažesniame vandens kiekiui mišinyje, sutankina PC ir MKA daleles tarpusavyje, užtikrindamas spartesnį naujadarų susidarymą.

5. Keičiant PC 10 % MKA priedu, sumažinamas bandinių tankis. Su MKA priedu gaunamas mažiausias tankis ir atitinkamai 23 % mažesnis stipris, palyginti su bandiniais, pagamintais vien iš PC. SPL įmaišos kiekis 0,5 % nuo rišamosios medžiagos kiekio leidžia ne tik padidinti cemento akmens stiprį ~7%, bet ir sumažinti V/C santykį iki 0,15. Naudojant mišrius priedus, t. y. 10 % MKA ir 0,5 % SPL, gniuždymo stipris gaunamas ~15 % mažesnis nei bandinių vien tik su PC, bet ~10 % didesnis, nei tik su MKA priedu.

6. Kompleksiškai panaudojus visus priedus (MKA, OII, SPL), cemento akmens makrostruktūroje susidaro sferinės poros, o pačiose tarpporinėse pertvarėlėse taip pat atsiranda smulkių porų. Atlikti makrostruktūros tyrimai rodo, kad cemento tešlą maišant 5 min, gaunamas cemento akmuo su stambiomis poromis bei didesniu tarpporinių pertvarėlių poringumu, o didinti maišymo trukmę iki 10 min yra neefektyvu, nes bandinių makrostruktūroje atsiranda didelių susisiekiančių porų.

7. Remiantis atliktais tyrimais suformuluota cementinę matricą modifikuojančių priedų veikimo cemento tešloje hipotezė: superplastiklis cemento tešloje sumažina vandens paviršiaus įtempimus, todėl vanduo vandeniniame tirpale susikaupia ant išorinių polikarboksilatinio superplastiklio polimero grandinių, o savo pagrindine grandine su išdėstytomis funkcinėmis karbo- grupėmis, polikarboksilatų apgaubia cemento daleles. Metakaolininė atlieka, naudojama kaip puolaninis priedas, padeda užpildyti tarpus tarp didesnių cemento dalelių ir suriša didelį kiekį vandens savo paviršiuje. Orą įtraukianti įmaiša cemento tešlos mišinyje skatina sutankinto mišinio porizaciją, užtikrina porų paviršių susidarymą, o esantis vandens kiekis leidžia plėstis porų paviršiui. Cemento dalelės stabdo cementinės matricos porų suirimą dėl greito kietėjimo.

8. Kompozito mišinių egzo tyrimai parodė, kad cementinę matricą sumaišius su lengvaisiais užpildais, cemento mineralų hidratacija sulėtėja nuo 1170 iki 1810 min, o egzoterminio efekto temperatūra sumažėjo nuo 65 iki 26 °C. Mažesnis tešlos kiekis sumažina išsiskiriančios šilumos kiekį tame pačiame bandinio tūryje ir kartu 640 min ilgina cemento mineralų rišimosi pradžios trukmę.

9. Nustatyta, kad termoizoliacinio kompozito gniuždymo stipris per pirmąsias tris paras pasiekia iki 70 % galutinio stiprio vertės. Nuo 7 iki 28 paros stiprio didėjimo intensyvumas yra pastovus ir nedidelis. Didžiausią poveikį gniuždymo stipriui daro PC kiekis. PC kiekiui kintant nuo 70 iki 130 kg/m³, gniuždymo stipris po 28 parų padidėja iki 55 %, nepriklausomai nuo užpildo rūšies.

10. Didėjant kompozitų su PSG užpildu tankiui nuo 247 iki 335 kg/m³, šilumos laidumo koeficientas padidėja nuo 0,0741 iki 0,0977 W/(m·K). Pakeičiant smulkiausią PSG frakciją trupinto EPS atliekų užpildu, galima sumažinti šilumos laidumo koeficientą, esant mažiausiam 70 kg/m³ PC kiekiui, nuo 0,0741 iki 0,0720 W/(m·K).

11. Nustatyta, kad intensyviausias kompozito įmirkis vyksta pirmąsias 10 min, po 20–30 min vyksta staigus vandens įmirkio intensyvumo mažėjimas. Tolesniame etape sugerties procesas išlieka panašus visuose kompozituose – per likusias 60 min įmirkio intensyvumas sumažėja du kartus, t. y. nuo ~1 g/m²s iki ~0,5 g/m²s. Didinant cementinės matricos kiekį, kompozito įmirkis mažėja, nes, esant didesniai PC kiekiui, gali susidaryti daugiau smulkių porų, kurios ir nulemia mažesnį įmirkį. Užpildai taip pat turi nemažą poveikį ilgalaikio įmirkio rezultatams. Naudojant 70 ir 100 kg/m³ PC, su PSG ir trupinta EPS atlieka, kompozito įmirkis yra ~14 % mažesnis nei užpildu naudojant tik PSG, o naudojant 130 kg/m³ PC, skirtumas sudaro ~18 %.

12. Nustatyta, kad užpildų poveikis susitraukimams ir plėtrai būna didesnis esant mažesniems PC kiekiams. Kai PC kiekis yra 70 kg/m³ linijinė deformacija su PSG užpildu siekia 0,52 mm/m, o su mišriu užpildu 0,28 mm/m. EPS atlieka paskirsto įtempimus ir labiau deformuojasi vidinėje kompozito struktūroje, dėl to sumažėja įtempimai visame kompozite ir būna mažesni susitraukimai bei plėtra. Didinant PC kiekį, kompozito karkasas stiprėja ir trupinta atlieka turi vis mažesnį poveikį atsirandančių įtempimų persiskirstymui. Didėjant PC kiekiui nuo 70 iki 130 kg/m³ linijinė deformacija didėja, su PSG užpildu iki 29 %, su mišriu užpildu iki 67 %.

13. Vertinant gautus rezultatus, nustatyta kad bandinių su PSG užpildu gniuždymo stiprio po 25 ir 100 šaldymo ir atšildymo ciklų sumažėjimas vienas ir nedidelis, Δf vertės svyruoja nuo 0 iki 3,6 %. Bandinių su PSG ir trupintų EPS atliekų užpildu gniuždymo stiprio po 25 šaldymo ir atšildymo ciklų sumažėjimas šiek tiek didesnis, didžiausia Δf vertė siekia 9,1 %, po 100 šaldymo ir atšildymo ciklų didžiausia Δf vertė siekia 18,2 %.

14. Nustatyta, kad kompozito su PSG užpildu organinių medžiagų kiekis gaminyje yra 0,41 %, todėl gaminiai priskiriami A1 degumo klasei. Kompozite su mišriu užpildu šoninio liepsnos sklidimo bandymo metu nebuvo, gaisro didėjimo spartos rodiklis lygus nuliui ir suminis šilumos kiekis tenkina leistiną A2 klasės medžiagoms, pagal liepsnojančių lašelių ir dalelių kritimą atitinka d0 klasifikaciją, o pagal dūmų susidarymo indeksą nustatyta s1 klasė. Taigi, 4K, 5K ir 6K sudėčių bandiniai atitinka A2-s1, d0 degumo klasę.

15. Atlikti kompozito struktūros tyrimai rodo, kad kontaktinėse zonose yra glaudus PSG ir cementinės matricos sąlytis, nėra tuštymų ar supleišėjimų, tačiau tarp granulių susidaro oro tarpai, nes kompozituose vien tik su PSG užpildu nepakanka smulkių granulių ar cemento tešlos joms užpildyti. Kai kompozituose naudojamas mišrus užpildas, oro ertmės kompozite tarp PSG užpildo trupintos EPS atliekos.

Bendrosios išvados

1. Nustatyta kad metakaolininės atliekos, plastifikuojantys, orą įtraukiantys priedai bei maišymo trukmė lemia termoizoliaciniam kompozitui skirtos cementinės matricos savybes bei makro- ir mikrostruktūrą.

1.1. Nustatyta, kad pakeitus portlandcementį 10 % metakaolininės atliekos priedu cementinės matricos hidratacijos procesas pailgėja nuo 7,3 iki 8,7 h, o mišinyje egzoterminės reakcijos maksimali temperatūra sumažėja 5 °C. Kompleksiškai panaudoti visi trys priedai lėtina cementinės matricos struktūros susidarymą, egzoterminio efekto maksimumas pasiekiamas tik 1100 min, esant 60 °C temperatūrai.

1.2. Nustatyta, kad metakaolininės atliekos priedas 9,5 % sumažina cemento akmens tankį dėl metakaolininės atliekos priedo savitojo paviršiaus ploto padidėjimo (2,5 karto), palyginti su portlandcemenčio dalelėmis. Kompleksinis (metakaolininės atliekos, plastifikuojančio, orą įtraukiančio) priedų poveikis mažinant cemento tešlos tankį labiausiai priklauso nuo cementinės matricos maišymo trukmės. Maišant mišinį 5 min, modifikuotos priedais cementinės matricos tankis sumažėja apie du kartus, nuo 2200 iki 1120 kg/m³.

1.3. Nustatyta, kad cementinę matricą modifikuojantis pucolaninis metakaolininės atliekos priedas sudaro sąlygas kalcio hidrosilikatų (C-S-H) susidarymui, dėl metakaolininėje atliekoje esančio aktyvaus SiO₂ kuris intensyviai reaguoja su portlanditu (Ca(OH)₂) ir skatina naujų (C-S-H) susidarymą. Modifikuo-

jant cementinę matricą, 10 % metakaolininės atliekos, 0,5 % plastifikuojančiu ir 0,05 % orą įtraukiančiu priedais ir pasirinkus 5 min maišymo trukmę kaip efektyviausią, susidaro stabili, porėta cemento akmens makro- ir mikrostruktūra, kai cementinės matricos tankis 1120 kg/m^3 , gniuždymo stipris $14,5 \text{ MPa}$.

2. Nustatyta, kad cementinės matricos kiekis ir lengvieji užpildai lemia sukurto termoizoliacinio kompozito fizikines bei mechanines savybes ir struktūrą.

2.1. Termoizoliaciniam kompozitui su putstiklio granulių užpildu naudojant 70 kg/m^3 portlandcemenčio, gaunamas 247 kg/m^3 tankio kompozitas, kurio gniuždymo stipris $0,38 \text{ MPa}$, šilumos laidumo koeficientas $0,074 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, vandens garų varžos faktorius 6 ir degumo klasė A1. Kompozito kontaktinėse zonose yra glaudus PSG ir cementinės matricos sąlytis, nėra tuštymų ar supleišėjimų, tačiau tarp granulių susidaro oro tarpai, nes kompozituose vien tik su PSG užpildu nepakanka smulkių granulių ar cemento teslos joms užpildyti. Atsparumo šalčiui tyrimai rodo, kad po 25 šaldymo ir atšildymo ciklų gniuždymo stipris sumažėja apie 2,3 %, todėl toks kompozitas gali būti naudojamas vidutiniškai agresyviomis aplinkos sąlygomis pastatų atitvarų konstrukcijose.

2.2. Termoizoliaciniam kompozitui su putstiklio granulių ir trupinto polistireninio putplasčio atliekos užpildu naudojant 70 kg/m^3 portlandcemenčio, gaunamas 227 kg/m^3 tankio kompozitas, kurio gniuždymo stipris $0,35 \text{ MPa}$, šilumos laidumo koeficientas $0,072 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, vandens garų varžos faktorius 8 ir degumo klasė A2-s1, d0. Kai kompozituose naudojamas mišrus užpildas, oro ertmės kompozite tarp PSG užpildo trupintos EPS atliekos. Atsparumo šalčiui tyrimai rodo, kad po 25 šaldymo ir atšildymo ciklų gniuždymo stipris sumažėja apie 9,1 %, todėl toks kompozitas gali būti naudojamas vidutiniškai agresyviomis aplinkos sąlygomis pastatų atitvarų konstrukcijose.

Literatūra ir šaltiniai

ACI Committee 213, *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, ACI 213R-03, 2003, Detroit, 38 p.

Albano, C.; Camacho, N.; Hernández, M.; Matheus, A.; Gutiérrez, A. 2009. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios, *Waste Management* 29(10): 2707–2716.

Alduaij, J.; Alshaleh, K.; Haque, M. N.; Ellaithy, K. 1999. Lightweight concrete in hot coastal areas, *Cement and Concrete Composites* 21: 453–458.

Aleknevičius, M. 2010. *Naftos krekinge naudoto katalizatoriaus poveikis ugniai atsparių betonų savybėms*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.

Aly, M.; Hashmi, M. S. J.; Olabi, A. G.; Messeiry, M.; Abadir, E. F.; Hussain, A. I. 2012. Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar, *Materials & Design* 33(1): 127–135.

Amran, Y. H. M.; Farzadnia, N.; Ali, A. A. A. 2015. Properties and applications of foamed concrete; a review, *Construction and Building Materials* 101: 990–1005.

Anagnostopoulos, C. A.; Echonomidis, C. 2015. Physical and Mechanical Properties of Cement Grouts Mixed with Different Super Plasticisers, *Research Journal of Applied Sciences, Engg and Technology* 10(2): 235–246.

Anagnostopoulos, C. A. 2014. Effect of different superplasticisers on the physical and mechanical properties of cement grotus, *Construction and Building Materials* 50: 162–168.

Ambroise, J.; Maximilien, S.; Pera, J. 1994. Properties of metakaolin blended cements, *Advanced Cement Based Materials* 1(4): 161–168.

Ashworth, T.; Ashworth, E. *Insulation Materials: Testing and Applications*, in: R.S. Graves, D.C. Wysocki (Eds.), ASTM Special Technical Publication, vol. 1116, ASTM, Philadelphia, PA, 1991, pp. 415–429.

Balčiūnas, G. 2015. *Statybinių kompozitų su pluoštinių kanapių spaliais tyrimai*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.

Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S., Badogiannis, E. 2005. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27(1):125–130.

Benazzouk, A.; Douzane, O.; Mezreb, K.; Laidoudi, B.; Quéneudec, M. 2008. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling, *Construction and Building Materials* 22: 573–579.

Berge, B. 2009. *The ecology of building materials*. 2nd ed. Architectural Press – Elsevier.

Bouguerra, A.; Ledhem, A.; Barquin, de F.; Dheilily, R. M.; Queneudec, M. 1998. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregate, *Cement and Concrete Research* 28: 1179–1190.

Bumanis, G.; Bajare, D.; Korjamins, A. 2013. Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concrete Made from Expanded Glass, *Journal of sustainable architecture and civil engineering* 2(3): 26–32.

Bumanis, G.; Bajare, D.; Locs, J.; Korjamins, A. 2013. Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight Concrete, *Construction and Building Materials* 47: 274–281.

Celik, K.; Meral, C.; Mancio, M.; Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. 2014. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash, *Construction and Building Materials* 67: 14–19.

Chen, B.; Liu, J. 2004. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber, *Cement and Concrete Research* 34(7): 1259–1263.

Chi, J. M.; Huang, R.; Yang, C. C.; Chang, J. J. 2003. Effects of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites* 25(2): 197–205.

Construction research & technology gmbh. 2006 12 21. *Method of delivery of agents providing freezing and thawing resistance to cementitious compositions*. Inventor: ONG, F. Int. Cl.2: C04 B 40/00. *Canadian Patent*, 2611895.

- Craig, P.; Steven, M. C.; Rodolfo, V. 2015. Potential for using waste glass in portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 10(4): 210–219.
- Cwirzen, A.; Penttala, V. 2005. Aggregate–cement paste transition zone properties affecting the salt–frost damage of high-performance concretes, *Cement and Concrete Research* 35(4): 671–679.
- Demirboga, R.; Gul, R. 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research* 33: 723–727.
- Demirboga, R., Gul R. 2003. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures, *Energy and Buildings* 35(11): 1155–1159.
- Dhir, R. K.; Newlands, M. D.; McCarthy, A. 2005. Use of Foamed concrete in construction. Thomas Telford Publishing, *Thomas Proceedings of the International Conference*: Telford Ltd: London. 174 p.
- Dinakar, P.; Pradosh, K. S.; Sriram, G. 2013. Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 7(3): 215–223.
- Donson, V. H. 1990. *Concrete admixture*. New York: Van Nostrand Reinhold. 211 p. ISBN 0442001495.
- Du, L.; Folliard, K. J. 2005. Mechanisms of air entrainment in concrete, *Cement and Concrete Research* 35(8): 1463–1471.
- Duan, P.; Shui, Z.; Chen, W.; Shen, C. 2013. Influence of superplasticiser on composition and pore structure of C-S-H, *Construction and Building Materials* 44: 87–91.
- Ducman, V.; Mirtič, B. 2014. Water vapour permeability of lightweight concrete prepared with different types of lightweight aggregates, *Construction and Building Materials* 68: 314–319.
- Ducman, V.; Mladenović, A.; Šuput, J. S. 2002. Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali–silica reactivity, *Cement and Concrete Research* 32(2): 223–226.
- Ferraris, C. F.; Obla, K. H.; Hill, R. 2001. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research* 31(2): 245–255.
- Ferrari, L.; Kaufmann, J.; Winnefeld, F.; Plank, J. 2010. Interaction of cement model systems with superplasticizers investigated by atomic force microscopy, zeta potential and adsorption measurements, *Journal of Colloid and Interface Science* 347(1): 15–24.
- Fraj, A. B.; Kismi, M.; Mounanga, P. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 24(6): 1069–1077.
- Fu, X.; Chung, D. D. L. 1997. Effects of silica fume, latex, methylcellulose, and carbon fibers on the thermal conductivity and specific heat of cement paste, *Cement and Concrete Research* 27(12): 1799–1804.

Gailius, A.; Vėjelis, S. 2010. *Termoizoliacinės medžiagos ir jų gaminiai*. Vilnius: Technika. 170 p.

Goberis, S.; Antonovič, V. 2007. *Kaitrai atsparūs šamotbetonai: monografija*. Vilnius: Technika. 360 p.

Gołaszewski J. 2007. *Influence of viscosity enhancing agent on properties of mortars with different cements and superplasticizers*. Silesian University of Technology, Faculty of Civil Engineering, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, Poland.

Gozelanczyk, T.; Hola, J. 2011. Pore structure of self – compacting concretes made using different superplasticizers, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 11(3): 611–621.

Gu, R.; Uysal, H.; Demirboga, R. *Investigation of the thermal conductivity of lightweight concrete made with Kocapinar's pumice aggregate*, Advances in Civil Engineering: III, Technical Congress 2 (1997) 553-562, METU, Ankara: Turkey.

Harun, T. 2009. Fuzzy logic model for prediction of mechanical properties of lightweight concrete exposed to high temperature, *Materials & Design* 30(6): 2205–2210.

Hassani, A.; Ganjidoust, H.; Maghanaki, A. A. 2005. Use of plastic waste(poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregatereplacement, *Waste Management & Research* 23(4): 322–327.

He, C.; Osbaeck, B.; Makovsky, E. 1995. Pozzolan reactions of six principal clay minerals: action, reactivity assessment and technological effects, *Cement and Concrete Research* 25(8): 1691–1702.

Hewlett, P.; Rixom R. 1977. *Superplasticized Concrete*, American Concrete Institute J. V. 74. N 5. P. 6-11.

Hurley, J. A. 2003. *UK Market survey for foam glass. Glass: research and development final report*, The Waste and Resources Action Programme, WRAP Report. 114 p.

Ke, Y.; Beaucor, A. L.; Ortola, S.; Dumontet, H.; Cabrillac, R. 2009. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials* 23: 2821–2828.

Khatib, J. M.; Clayb, R. M. 2004. Absorption characteristics of metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research* 34(1): 19–29.

Khatib, J. M.; Negim, E. M.; Gjonbalaj, E. 2012. High volume metakaolin as cement replacement in mortar, *World Journal of Chemistry* 7(1): 07–10.

Khatib, J. M.; Shariff, S.; Negim, E. M. 2012. Effect of Incorporating Foamed Glass on the Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams, *World Applied Sciences Journal* 19(1): 47–51.

Khonsari, V.; Eslami, E.; Anvari, A. 2010. *Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete*, Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings

and Structural Applications. Korea Concrete Institute, ISBN 978-89-5708-182-2. 1354–1361 p.

Kim, K. H.; Jeon, S. E.; Kim, J. K.; Yang, S. 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete, *Cement and Concrete Research* 33(3): 363–371.

Kizinievič, V. 2008. *Technologinių veiksmų poveikis keraminių mūro gaminių atsparumui šalčiui*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.

Kearsley, E. P.; Mostert, H. F. 2005. *The use of foamed concrete in refractories*, in: R.K. Dhir, M.D. Newlands, A. McCarthy (Eds.), *Use of Foamed Concrete in Construction*, Thomas Telford, London. p. 89–96.

Kligys, M. 2009. *Kompozitinės medžiagos iš poringosios cemento teslos ir trupinto polistireninio putplasčio gamybos technologija ir savybės*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.

Kliosova, A. I.; Golubeva, O. A. 2013. *The influence of complex metakaolin additives on the properties of cement stone*. In: Proceedings of the 17th International Scientific Symposium of students, Post graduates and young Scientists devoted to the 150th Anniversary of Academician V. A. Obruchev and 130th Anniversary of Academician M. A. Vsov, Founders of Siberian Mining School: problems of geology and subsurface development. Tomsk Polytechnic University Publishing house.

Kose, S.; Bayer, G. 1982. Schaumbildung im System Altglas-SiC und die Eigenschaften derartiger Schaumglaser, *Glastech. Ber.* 55(7): 151–160.

Kockal, N. U.; Ozturan, T. 2011. Optimization of properties of fly ash aggregates for highstrength lightweight concrete production, *Materials & Design* 32(6): 3586–3593.

Kockal, N. U.; Ozturan, T. 2011. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes, *Materials & Design* 32(4): 2396–2403.

Kou, S. C.; Lee, G.; Poon, C. S.; Lai, W. L. 2009. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste Management* 29: 621–628.

Kwan, A. K. H.; Chen, J. J. 2013. Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste, *Powder Technology* 234: 19–25.

Larbi, J. A.; Bijen, J. M. 1992. Influence of pozzolans on the portland cement paste-grgregate interface in relation to diffusion of ions and water absorption in concrete, *Cement and Concrete Research* 22: 551–562.

Lamond, J. F.; Pielert, J. H. 2006. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*: (STP 169D), Philadelphia, Pa, USA 226–228. 655 p.

Laukaitis, A. 2000. *Akytųjų betonų formavimo mišinių ir gaminių savybės*. Monografija. Vilnius: Technika

Laukaitis, A.; Žurauskas, R.; Kerienė, J. 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, *Cement and Concrete Composites* 27(1): 41–47.

Lazniewska-Piekarczyk, B. 2014. The methodology for assessing the impact of new generation superplasticizers on air content in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 53: 488–502.

Li, Z.; Ding, Z. 2003. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, *Cement and Concrete Research* 33(4):579–584.

Limbachiya M.; Meddah M. S.; Fotiadou S. 2011. Performance of granulated Foamed glass concrete, *Construction and Building Materials* 28(1): 759–768.

Liu, X.; Chia, K. S.; Zhang, M. H. 2010. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration, *Cement and Concrete Composites* 32(10): 757–766.

Lo, T. Y.; Tang, W. C.; Cui, H. Z. 2007. The effects of aggregate properties on lightweight concrete, *Building and Environment* 42(8): 3025–3029.

Naujokaitis, A. 2006. *Statybinės medžiagos: užpildai: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika. 247 p.

Navarro-Blasco, I.; Pérez-Nicolás, M.; Fernández, J. M.; Duran, A.; Sirera, R.; Alvarez, J. I. 2014. Assessment of the interaction of polycarboxylate superplasticizers in hydrated lime pastes modified with nanosilica or metakaolin as pozzolanic reactives, *Construction and Building Materials* 73: 1–12.

Nemes, R. 2006. *Lightweight concrete made with expanded glass aggregate*. Doctoral dissertation. University of Technology and Economics, Budapest.

Neville, A. M. 1995. *Properties of Concrete*. Essex, England: Longman Group Limited.

Nicolas, R. S.; Cyr, M.; Escadeillas, G. 2014. Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement, *Construction and Building Materials* 55: 313–322.

Janavičius, E., Skripkiūnas, G., Daukšys, M. 2008. *Šaltilčių techninių parametrų gerinimas panaudojant keramzitbetonį, iš Tarptautinės konferencijos „Pažangioji statyba“, įvykusios 2008 m. lapkričio 13–14 d. pranešimu medžiaga*. Kaunas: Technologija, 248–254.

Jasaitienė, J.; Ivanauskas, E.; Daukšys, M. 2010. *Investigation of lightweight concrete with porous aggregates*. In: Proceeding of the 2nd international conference advanced construction, Kaunas.

Jézéquel, P. H.; Collin, V. 2007. Mixing of concrete or mortars: Dispersive aspects, *Cement and Concrete Research* 37(9): 1321–1333.

Jolicoeur, C.; Simard, M. A. 1998. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts, *Cement and Concrete Composites* 20(2–3): 87–101.

Macedo, P. M. B. 2011. *Strong, lower density composite concrete building material with foam glass aggregate*, US Patent 7695560.

- Madandoust, R.; Ghavidel, R. 2013. Mechanical properties of concrete containing waste glass powder and rice husk ash, *Biosystems Engineering* 116(2): 113–119.
- Martusevičius, M.; Kaminskas, R.; Mituzas, J. A. 2002. *Rišamųjų medžiagų cheminė technologija*. Kaunas: Technologija. 206 p. ISBN 9986-09-255-6.
- Mazloom, M.; Ramezaniapour, A. A.; Brooks, J. J. 2004. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites* 26(4):347–57.
- McGovern, G. 2000. *Manufacture and supply of ready-mix foamed concrete, One Day Awareness Seminar on Foamed concrete Properties, Applications and Potential*, vol. 294, University of Dundee, Scotland.
- Mehta PK, Monterio PJM. *Concrete structure properties and materials*. England Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1993.
- Mielenz, R. C.; Wolkodoff, V. E.; Backstrom, J. S.; Flack, H. L. 1958. Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete: Part 1. Entrained air in unhardened concrete, *Journal of the American Concrete Institute* 30(1): 95–121.
- Mirzahassemi, M.; Riding, K. A. 2014. Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder, *Cement and Concrete Research* 58: 103–111.
- Mohammed, B. S.; Fang, O. C. 2011. Mechanical and durability properties of concretes containing paper-mill residuals and fly ash, *Construction and Building Materials* 25: 717–725.
- Moon, J.; Speziale, S.; Meral, C.; Kalkan, B.; Clark, S. M.; Monteiro, P. J. M. 2013. Determination of the elastic properties of amorphous materials: Case study of alkali-silica reaction gel, *Cement and Concrete Research* 54: 55–60.
- Morabito, P. 1989. *Measurement of thermal properties of different concretes*, High Temp., High Press 21(1): 51–59.
- Mueller, A., Schnell, A., and Ruebner, K. 2015. The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry rubble. *Construction and Building Materials*, Volume 98, 15 November 2015, Pages 376–387.
- Mueller, A.; Sokolova, S. N.; Vereshagin, V. I. 2008. Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials, *Construction and Building Materials* 22(4): 703–712.
- Papo, A.; Piani, L. 2004. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research* 34(11): 2097–2101.
- Pavlíková, M.; Brtník, T.; Keppert, M.; Černý, R. 2009. *Effect of metakaolin as partial portlandcement replacement on properties of high performance mortars*, Cement Wapno Beton, 3/113.
- Poon, C. S.; Kou, S. C.; Lam, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica, *Construction and Building Materials* 20(10): 858–865.

Oertel, T.; Helbig, U.; Hutter, F.; Kletti, H.; Sextl, G. 2014. Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research* 58: 121–130.

Ozawa, K.; Ouci M. 2001. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo 743, ISBN 4-90154-04-0

Qing, Y.; Zenan, Z.; Deyu, K.; Rongshen, C. 2007. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, *Construction and Building Materials* 21(3): 539–545.

Ramachandran, V. S. 1995. *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. Second Edition*, Canada.

Rashad, A. M. 2013. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview, *Construction and Building Materials* 41: 303–318.

Ravindrarajah, S. R. 1999. Bearing strength of concrete containing polystyrene aggregate, *Durability of Building Materials and Components*, Institute for Research in Construction, Ottawa: Canada. 8: 505–514.

Rosenberg, A. 2010. *Using fly ash in concrete* [interaktyvus], žiūrėta 2015 m. lapkričio 5 d.]. Prieiga per internetą:

<<http://precast.org/2010/05/using-fly-ash-in-concrete>>

Roslan, A. F.; Awang, H.; Mydin, M. 2013. Effects of various additives on drying shrinkage, compressive and flexural strength of lightweight foamed concrete (LFC), *Advanced Materials Research* 626: 594–604.

Routschaka, G.; Diachenolt, D. M.; Wutz, K. 2000. *New plasticizer for ultralow cement (ULCC) andalusite and bauxite castables* [interaktyvus], žiūrėta 2015 m. lapkričio 29 d.]. Prieiga per internetą:

<<https://www.dispersionspigments.basf.com/portal/streamer?fid=348623>>

Sach, J. Seifert, H. 1999. *Foamed Concrete Technology: Possibilities for Thermal Insulation at High Temperatures*, vol. 76(9), CFI Ceramic Forum International, Göller. p. 23–30.

Saika, N. J.; Sengupta, P.; Gogoi, P. K.; Borthakur, P. C. 2002. Hydration behaviour of lime-co-calcined kaolin-petroleum effluent treatment plant sludge, *Cement and Concrete Research* 32(2): 297–302

Saikia, N.; Brito, D. J. 2012. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials* 34: 385–401.

Salager, J. L. 2002. *Surfactants types and uses*. Firp booklet E300-A, versijon 2. Mérida: Universidad de Los Andes. 49 p.

Sayil, B. M.; Gurdal, E. 1999. *The physical properties of polystyrene aggregated gypsum blocks. Durability of building materials and components*, Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada. p. 8: 496–504

Schwarz, N.; Cam, H.; Neithalath, N. 2008. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement and Concrete Composites* 30(6): 486–496.

Sengul, O.; Azizi, S.; Karaosmanoglu, F.; Tasdemir, M. A. 2011. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete, *Energy and Buildings* 43(2–3): 671–676.

Shannag, M. J. 2011. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures, *Construction and Building Materials* 25: 658–662.

Shi, C.; Wu, Y.; Riefler, C.; Wang, H. 2005. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research* 35(5): 987–993.

Siddique, R., Klaus, J. 2009. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Applied Clay Science* 43(3–4): 392–400.

Siddique, R. 2011. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, *Resources, Conservation and Recycling* 55(11): 923–932.

Silva, R. V.; Brito, D. J.; Saikia, N. 2013. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates, *Cement and Concrete Composites* 35(1): 23–31.

Sinica, M. 2001. *Dispersinių ir pluoštinių intarpų įtaka kompozitų iš porizuoto betono savybėms*. Daktaro disertacija, Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija 08T, Vilnius.

Sinica, M.; Laukaitis, A.; Sezemanas, G.; Kligys, M. 2008. Operational properties of a heat-insulation composite with expanded polystyrene crumbs, *Mechanics of Composite Materials* 44(4): 415–424.

Shao, Y.; Lefort, T.; Moras, S.; Rodriguez, D. 2000. Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research* 30(1): 91–100.

Short, A.; Kinniburg, W. 1978. *Lightweight Concrete*, Galliard (Printers), Great Yarmouth, Great Britain.

Skripkiūnas, G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės: vadovėlis*. Kaunas: UAB „Vitaė Litera“. 334 p.

Sobolev, K. 2004. The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures, *Cement and Concrete Composites* 26(7): 901–907.

Spiesz, P.; Yu, Q. L.; Brouwers, H. J. H. 2013. Development of cement-based lightweight composites – Part 2: Durability-related properties. *Cement and Concrete Composites*. Volume 44, November 2013, Pages 30–40.

Steiger, R. W.; Hurd, M. K. 1978. Lightweight insulating concrete for floors and roof decks, *Concrete Construction* 23: 411–422.

Szwabowski, J.; Lazniewska-Piekarczyk, B. 2009. Air-entrainment problem in self compacting concrete, *Journal of Civil Engineering and Management* 15(2): 137–147.

Topçu, I. B.; Işıkdag, B. 2008. Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete, *Journal of Materials Processing Technology* 204(1–3): 34–38.

Türkmen, İ.; Kantarcı, A. 2007. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, *Building and Environment* 42(6): 2378–2383.

Aeroc UAB [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2016 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: <<http://lt.lt.allconstructions.com/portal/categories/95/1/0/1/article/17655/dregmes-ir-vandensigeriamumo-reiksme-blokeliams>>

Uysal, H.; Demirboga, R.; Sahin, R.; Gu, R. 2004. The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete, *Cement and Concrete Research* 34(5): 845–848.

Ünal, O.; Uygunoglu, T.; Yildiz, A. 2007. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation, *Building and Environment* 42(2): 584–590.

Vaitkevičius, V.; Šerelisa, E.; Hilbig, H. 2014. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials* 68: 102–109.

Velches, J.; Ramezani, M.; Neitzert, T. 2012. Experimental investigation of the fire resistance of ultra-lightweight foam concrete, *Int. J. Adv. Eng. Appl.* 1(4): 15–22.

Von Bahr, M. 2003. *Wetting and capillary flow of surfactant solution and inks. Akademisk avhandling för teknologie doktorsexamen.* Lund University and Institute for Surface Chemistry. Lund: Lund University. 77 p.

Vu, D. D. 2002. *Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete.* DOP science. Delft: Delft University Press. 152 p.

Wang, J. Y.; Chia, K. S.; Liew, J. Y. R.; Zhang, M. H. 2013. Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content, *Cement and Concrete Composites* 43: 39–47.

Wutz, K. 2001. *Advanced polymers for monolithic refractories.* Proceedings of the Biennial Worldwide Congress on Refractories UNITECER: 85–97;

Xu, Y.; Chung, D. D. L. 2000. Improving silica fume by using silane, *Cement and Concrete Research* 30: 1305–1311.

Yu, Q. L.; Spiesz, P.; Brouwers, H. J. H. 2013. Development of cement-based lightweight composites – Part 1: Mix design methodology and hardened properties, *Cement and Concrete Composites* 44: 17–29.

Yun, T. S.; Jeong, Y. J.; Han, T. S.; Youm, K. S. 2013. Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes, *Energy and Buildings* 61: 125–132.

Zareef, M. A. M. 2010. Conceptual and Structural Design of Buildings made of *Lightweight and Infra-Lightweight Concrete*. PhD Thesis, Berlin, Germany: Technical University Berlin.

Бужевич, Г. А. 1970. *Легкие бетоны на пористых заполнителях*. Москва: издательство литературы по строительству. 272 с.

Комар, А. Г. 1988. *Строительные материалы и изделия*. Москва: Высшая школа. 527 с.

Миленин, Д. А. 2014. *Бетон с поликарбоксилатами для подземных частей транспортных сооружений в условиях сульфатоагрессивных сред, 05.23.05 «Строительные материалы и изделия*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Научный руководитель Рояк Генрих Соломонович, Москва.

Рамачандран, В. С.; Розенберг, Т. И.; Болдырева, С. А. 1988. *Добавки в бетон: справочное пособие*. Москва: Стройиздат. 571 р.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Šeputytė-Jucikė, J.; Sinica, M. 2016. The effect of expanded glass and polystyrene waste on the properties of lightweight aggregate concrete, *Engineering Structures and Technologies*, 8(1): 31–40, ISSN 2029-882X/Eissn 2029-8838.

Šeputytė-Jucikė, J.; Sezeman, G. A.; Sinica, M.; Kligys, M.; Vaitkus, S. 2014. Impact of granules from crushed expanded polystyrene package on properties of thermo-insulating plaster, *Journal of civil engineering and management* 20(4): 581–589, ISSN 1392-3730.

Pundienė, I.; Kligys, M.; Šeputytė-Jucikė, J. 2014. Portland cement based lightweight multifunctional matrix with different kind of additives containing SiO₂, *Key Engineering Materials. Engineering Materials & Tribology XXII*. Zurich: Trans Tech Publications Ltd. 604: 305–308, ISSN 1013-9826.

Straipsniai kituose leidiniuose

Šeputytė, J.; Sinica, M. 2013. Pūsto stiklo granulių poveikis fizikinėms cementinio kompozito savybėms. *16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2013 metų teminės konferencijos „Statyba“ (2013 m. kovo 20–22 d.) straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-7149, 1–8.

Lietuvos patentų biure įregistruoti patentai

Sinica, M.; Šeputytė-Jucikė, J.; Kligys, M.; Sezeman, G. A.; Vėjelis, S. Porėto skiedinio kompozicija ir gamybos būdas: patentas. Vilnius, 2015. 7 p.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

This thesis solves the problem how to utilize technological wastes accumulating during manufacturing by using them for the development of novel and efficient building composites designed for the development of building structure envelopes.

Lithuania does not have enough natural resources which could supply the growing construction industry and the exploitation of available resources faces great technological and nature protection problems, the extraction of resources requires great investments. Regarding the price of raw materials and reduction in natural resources, the usage of wastes is a potential alternative for the Lithuanian building industry. Reuse of wastes is very important from different perspectives. It helps to save and conserve natural resources, reduce environmental pollution and helps saving and recycling energy production processes.

In the past year, increasing the requirements for building materials, it is important to develop perspective and novel material which could successfully assure water vapour elimination from the building, be non-flammable and not harmful to human health when metakaoline (the waste from cellular glass production), cellular glass (from cullet) and crushed expanded polystyrene waste beads (from EPS wastes) are used for the development of such building materials.

Relevance of the thesis

Lithuanian industry faces the problem concerning technological wastes for which the recycling or reuse opportunities have not been solved yet. One of the scientific directions is utilization of such wastes for the development of building composites.

The usage of such wastes for the development and production of lightweight composite materials is related not only to waste recycling but to improvement of composite materials properties, the reduction in building expense and work effectiveness as well. The application of thermal insulating composites with production wastes allows reduction in technological processes number in construction object by replacing multilayered structure envelopes with one composite material.

Furthermore, thermal insulating composite materials with production wastes fully meet essential building requirements, increase energy efficiency of the building, assure comfortable indoor microclimate, are not harmful to human health and environment.

Object of the thesis

Thermal insulating composite from cementitious matrix modified with metakaoline waste (MKW), superplasticizing (SPL) and air-entraining (AEA) additives and lightweight aggregates (cellular glass beads (CGB), crushed expanded polystyrene waste (crushed EPS waste)).

Aim of the thesis

The aim of the thesis is to investigate the impact of modifying additives on the structure and properties of cementitious matrix. To develop thermal insulating composite material from modified cementitious matrix and lightweight aggregates as well as investigate its structure and performance.

Objectives of the thesis

To achieve the aim of this thesis, it is necessary to accomplish the following tasks:

1. To investigate the impact of modifying additives on exothermic reaction, physical-mechanical properties and structure of cementitious matrix;
2. To develop thermal insulating composite from modified cementitious matrix and lightweight aggregates and investigate the impact of lightweight aggregates and modified cementitious matrix amount structure and performance on developed thermal insulating composite.
3. To explain the principle of modifying additives action in cementitious matrix.

Research methodology

Physical and mechanical properties of lightweight aggregates, cementitious matrix and composites were determined according to standard methods as follows: LST EN 1097-3, LST EN 13055, LST EN 1015-10, LST EN 1015-11, LST EN 1602, LST EN 12664, LST EN 826, LST EN 12089, LST EN 12086, LST EN 722-11, LST EN 12087, LST EN 13501-1+A1, LST L 1428.17. Analyzing the impact of additives and lightweight aggregates on curing speed of cementitious binder, the measurement of exothermic effect temperature was conducted. In order to assess the structure of cementitious matrix

and thermal insulating composite, scanning electron microscopy, X-ray and ultrasound analyses were implemented. Predicted operational freeze-thaw resistance was calculated in accordance with methodology prepared by Lithuanian scientists when determining macrostructural indicators for specimens.

Scientific novelty of the thesis

The following results, which are new to the engineering science, are obtained during the preparation of thesis:

1. The impact of cementitious matrix modifying additives (metakaoline waste, plasticizing and air-entraining additives) as well as technological parameters (mixing duration) on exothermic reaction, density, strength characteristics and structure of cementitious matrix is determined and explained the mechanism of cementitious matrix modifying additives action in cement paste. This allows expanding of scientific knowledge of production methods of the low-density porous cement stone.
2. Novel thermal insulating composite material with a small amount of modified cementitious matrix, that ensures a required connection between the lightweight aggregates, and cementitious matrix is developed. The impact of lightweight aggregates on performance and structure of thermal insulating composite is determined.

Practical value of research findings

Thermal insulating composite materials from modified cementitious matrix with cellular glass beads and crushed expanded polystyrene waste as aggregates are developed during international EUREKA project E! 8790 – “Enclosurewasteconcrete”. Thermal insulating composite can be used in building structure envelopes (walls, partitions, roof, spans and floors) when exposed to averagely aggressive environmental conditions.

The use of MKW and EPS in the production of thermal insulating composite solves the problem of repeated recycling of such wastes.

Defended statements

1. Metakaoline waste, plasticizing and air-entraining additives as well as mixing duration allows to regulate structure, density and physical-mechanical properties of cementitious matrix used for thermal insulating composite.
2. The ratio of additives modified cementitious matrix and lightweight aggregates (CGB and crushed EPS waste) and aggregates arrangement determines physical-mechanical and thermal insulating properties of cementitious composite.

Approval of the research findings

4 scientific articles are published on the topic of the dissertation: one in scientific journal included in the *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)* with a citation index, two – in scientific journals of international databases; one – in the Lithuanian conference proceedings. Results of this thesis were presented in 4 conferences in Lithuania and other countries. One patent is received.

Structure of the dissertation

Thesis consists of introduction, three chapters and a summary. There are 4 annexes as well. The work consists of 111 pages excluding annexes and summary, there are 40 numbered equations, 48 figures and 12 tables. 145 references are used when writing dissertation.

1. Review of literature on the subject of raw materials for the production of lightweight composites their properties and application

After conducting the literature review, it was noticed that MKW according its properties is an active pozzolanic additive. The advantage of MKW compared to other pozzolanic additives is its fine state, impact on physical-mechanical properties of cement paste, ecology and lower prime cost.

Scientific literature presents the air-entraining, plasticizing and pozzolanic additives as enhancement of cementitious matrix properties. It is as well observed that air-entraining, plasticizing and pozzolanic additives are used separately. The complex application of such additives is not analysed.

During the literature review, it was determined that the application of CGB and its impact on structure and performance of lightweight composites are not sufficient even though the potential for application, having in mind the amount and not harmful nature of glass, is vast. The presented densities and thermal conductivity of composites are rather high. However, there is almost no information about the impact of CGB beads on lightweight composites and completely no information for composites with the mixture of CGB and EPS as aggregates.

2. Review of raw materials and research methods for thermal insulating cementitious composite

Performance of cementitious matrix and composites is determined in accordance with standard methods as follows: density according to LST EN 1015-10, compressive strength – LST EN 1015-11, density of the composites – LST EN 1602, thermal conductivity – LST EN 12664, compressive strength – LST EN 826, water vapour transmission – LST EN 12086, long-term water absorption by total immersion – LST EN 12087, classification using test data from reaction to fire – LST EN 13501-1+A1, freeze-thaw resistance – LST L 1428.17. Analyzing the impact of additives and lightweight aggregates on the curing speed of cementitious matrix, measurements of exothermic effect temperature are conducted. In order to evaluate the structure of cementitious matrix and composite material, scanning electron microscopy, X-ray and ultrasound analyses methods are used.

Assessing the impact of used additives (MKW, AEA and SPL) and lightweight aggregates (CGB and crushed EPS waste) on properties of cementitious matrix and composite, 8 compositions for cementitious matrix (Table S1) and 6 compositions for thermal insulating composite (Table S2) are formed.

Table S1. Compositions of forming mixtures for cementitious matrix

Composition designation	Amount of components, % by mass				W/C*	W/R**
	PC	MKW	Amount by PC mass, %			
			SPL	AEA		
1	100	–	–	–	0.24	–
2	100	–	–	0.05	0.23	–
3	100	–	0.5	–	0.15	–
4	100	–	0.5	0.05	0.14	–
5	90	10	–	–	0.28	0.25
6	90	10	–	0.05	0.27	0.24
7	90	10	0.5	–	0.18	0.16
8	90	10	0.5	0.05	0.17	0.15

*) Water and PC ratio

**) Water and binding material, consisting of PC and MKW, ratio

Table S2. Compositions of forming mixtures for thermal insulating composite

Materials, units	Composite designation					
	1K	2K	3K	4K	5K	6K
PC, kg/m ³	70	100	130	70	100	130
MKW, kg/m ³	7	10	13	7	10	13
SPL, kg/m ³	0.35	0.50	0.65	0.35	0.50	0.65
AEA, kg/m ³	0.0175	0.0250	0.0325	0.0175	0.0250	0.0325
CGB (8–16 mm), kg/m ³	72	72	72	72	72	72
CGB (4–8 mm), kg/m ³	28	28	28	28	28	28
CGB (0–2 mm), kg/m ³	58	58	58	–	–	–
Crushed EPS waste (0–2 mm), kg/m ³	–	–	–	5	5	5
Water, kg/m ³	14	28	40	46	53	68

3. Research of cementitious matrix and thermal insulating composite

The impact of modifying additives on hydration process of cement minerals is shown by calorimetry measurements presented in Figure S1. 1st curve (where only PC is used) in Figure S1 shows the maximum temperature of hydration exothermic reaction (93.1 °C) which is achieved in 438 mins. Changing 10 % of PC mass by MKW additive (5th curve), the hydration of cement minerals slightly increases, due to reduction in PC amount, the exo maximum is reached after 522 mins and the temperature is 88.5 °C.

The research data have shown that the usage of AEA additive differently affects the temperature and time of exo reaction (2nd and 6th curves). Using AEA additive with pure PC and when 10 % of PC is changed by MKW, the time of exo maximum only slightly shortens and temperature vice versa – of pure PC with AEA decreases up to 75 °C and when 10 % of PC is changed by MKW – up to 74.5 °C.

SPL highly slows the hydration process of cement minerals (3rd and 7th curves). When composition from pure PC is used, exo reaction maximum from mineral hydration is 960 mins, and maximum temperature – 72 °C (3rd curve); at composition with PC and 10 % of MKW, exo maximum is reached a bit later. After 1060 mins the temperature is a bit lower – 66.5 °C (7th curve). Hydration process is mostly impeded when both additives, i.e. SPL and AEA, are used in forming mixtures. These additives, when the forming mixture from PC is used, lengthen hydration exo temperature of cement minerals from 438 to 1118 mins, and reduces the temperature from 93.1 to 65.9 °C (comparing 1st and 4th curves), when 10 % of PC is changed by MKW in cement paste, the temperature of exo maximum lengthens the time from 522 min., to 1170 min. and temperature reduces from 88.5 °C to 59.5 °C (comparing 5th and 8th curves). The effect may be explained by reduced temperature which is influenced by the mixture components receptivity to absorb the temperature emitted during exothermic effect.

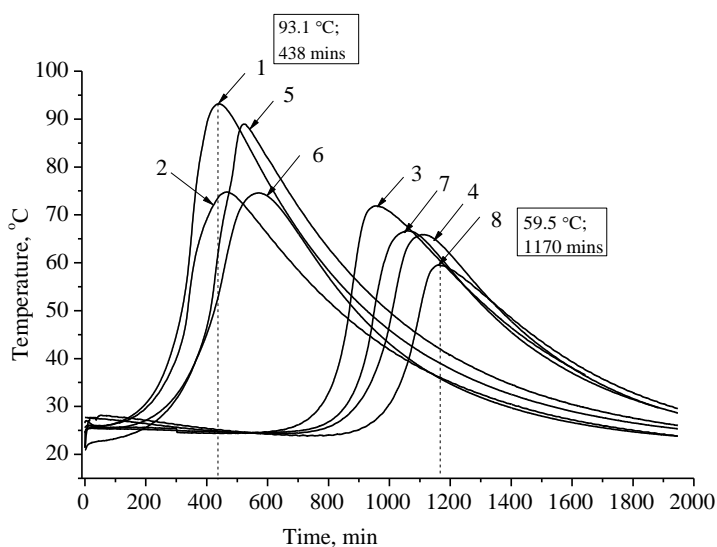


Fig. S1. Effect of additives on the exothermal reaction of hydration process for fresh cement paste mixtures: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table S1)

The impact of chosen additives on cement stone, depending on mixing duration, is presented in Figures S2 and S3. It can be observed from Figure S2 that the density of cement stone reduces when 10 % of PC is changed by pozzolanic MKW additive. The density of cement stone varies from 1955 to 1770 kg/m³ (comparing 1st and 5th columns).

The use of SPL plasticizer increases the density of pure PC stone by 12.5 % and by 3.4 % for PC and MKW additive. The highest reduction in density occurs when AEA additive is used. The use of MKW, SPL and AEA complex reduces cement density from 1955 to 1120 kg/m³, i.e. by 42.7 %, after 5 mins of mixing.

AEA allows significant reduction in density of cement stone providing with porous structure. The magnitude of porosity depends on the mixing duration of forming mixture with AEA admixture (Fig. S3). Conducting this research, the dependency is determined and regression equations as well as coefficients of determination are obtained.

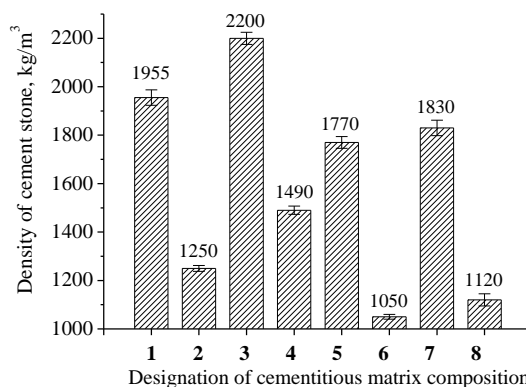


Fig. S2. Effect of additives on cement stone density: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table S1)

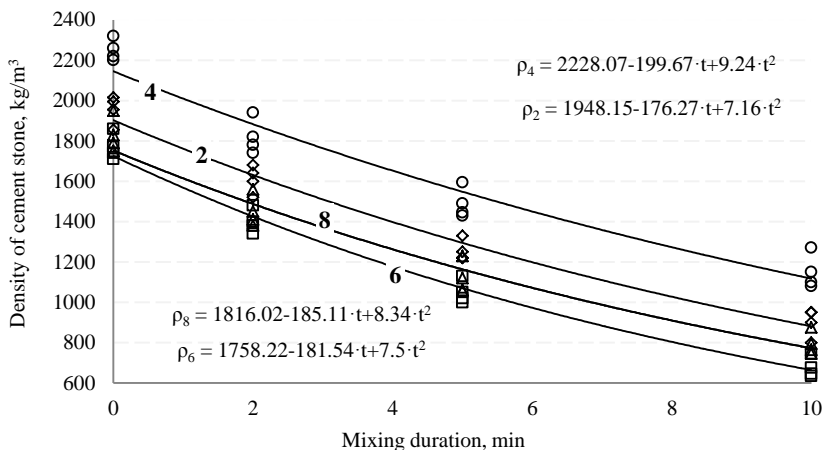


Fig. S3. Effect of mixing time on cement stone density: 2, 4, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table S1)

The lowest density of cement stone is obtained when PC is partially replaced by MKW and used with AEA. After 2 mins of mixing, the density of pure PC is reduced up to 1600 kg/m^3 , of MKW modified cement up to 1400 kg/m^3 . After mixing mixtures respectively for 5 and 10 mins, the density of porous cement stone is reduced from 1250 to 900 kg/m^3 and from 1050 to 675 kg/m^3 with MKW additive (2nd and 6th curves). SPL admixture arrests the reduction in concrete specimen porosity (4th and 8th curves). Using only PC with SPL in forming mixtures, the density after mixture mixing for 10 mins varies from 2200 to 1150 kg/m^3 (4th curve) and from 1830 to 795 kg/m^3 for MKW modified mixture. It can be seen that the density of porous concrete is mostly reduced when MKW waste and a complex of other additives are used, i.e. 2.5 times (6th curve).

The impact of used additives on compressive strength of cement stone, depending on additives and mixing duration, is presented in Figures S4 and S5. Basically, compressive strength of specimens is dependant on density which is determined by nature and specifics of additives. Figure S4 presents the results of compressive strength. MKW reduces the density of specimens and affects the formation of new derivatives. The lowest density and by 23 % lower compressive strength (column of 5th composition) compared to specimens obtained from pure PC (column of 1st composition) is obtained when MKW is used. 0.5 % of SPL from the amount of PC allow not only the increment in strength by ~7 % of cement stone but reduction in W/C up to 0.15 as well. Using mixed additives, i. e. 10 % of MKW and 0.5 % of SPL, by ~15 % lower compressive strength compared to specimens from pure PC and by ~10 % higher compared to specimens with only MKW is obtained. Therefore, SPL positively affects the compressive strength of composite. Such effect can be explained by the effect of superplasticizer which is based on polycarboxylate ethers. It is characterized by well dispersion of cement particles under the low W/C ratio as well as ability to increase early compressive strength and densification of mixture particles, by 50 % increase flowability of concrete paste, reduce water input and improve physical-mechanical properties of the material. The value of compressive strength when all additives and AEA are used is presented in the column of 8th composition (Figure S4).

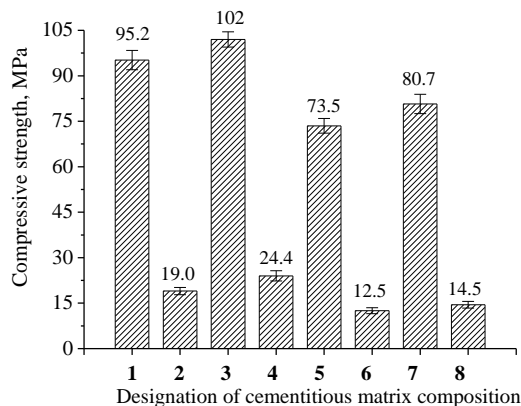


Fig. S4. Effect of additives on compressive strength of cement stone: 1–8 designation of cementitious matrix composition (Table S1)

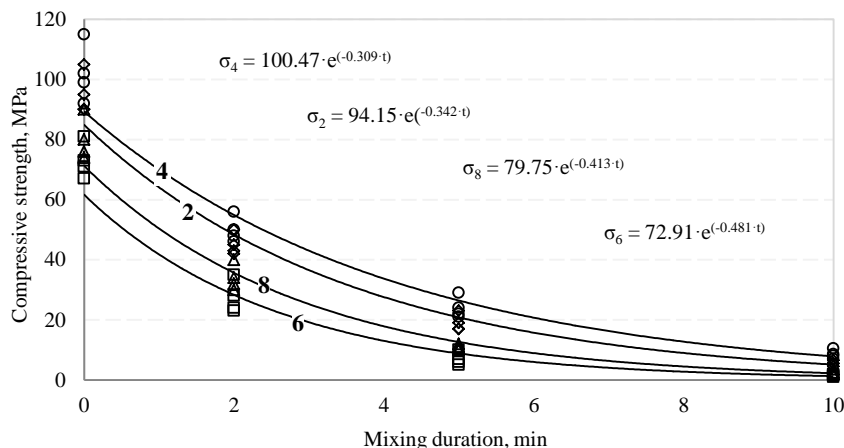


Fig. S5. Effect of mixing time on compressive strength of cement stone: 2, 4, 6, 8 – designation of cementitious matrix composition (Table S1)

Figure S5 presents the dependence, regression equations and determination coefficients of compressive strength values on mixing duration when AEA additive is used. The results show the reduction in compressive strength due to increased porosity, reduction in thickness of partitions between the air which occur during the mixing. It can be seen from Figure S5 that using AEA, the most important parameter is mixing duration. During the first 5 mins of mixing, independently from other additives, the values of compressive strength are reduced 10 times. It can be explained by the inclusion of high amount of air bubbles, consequently, partitions between the air become thinner and compressive strength of cement stone decreases.

The impact of additives on macrostructure is determined after 2, 5 and 10 mins after mixture mixing when AEA additive is used. The results are presented in Table S6.

AEA additive during mixing entraps air and forms air bubbles of various sizes. The longer mixture mixing duration, the higher air conglomeration, which forms larger pores in cement stone. The analysis of macrostructure images and obtained data allow choosing the rational mixing duration. Figure S6 a presents the macrostructure of cement stone after mixing for 2 mins. Even distribution and formation of regular-shaped pores can be seen, however, the density of cement stone is too high for intended use as composite having low density and thermal conductivity. When mixing duration is up to 5 mins, cement stone with larger pores and more notable porosity of partitions between air is obtained (Fig. S6 b). When mixing for 10 mins (Fig. S6 c), occurrence of coarse interconnected pores can be seen. It is assumed that air gaps connect with each other and irregularly shaped and chaotically distributed cavities form in cement stone. Macrostructure analysis shows that mixing duration up to 5 mins is the most effective because closed pores are evenly distributed in cement stone matrix, therefore, cement stone having low density and sufficient physical-mechanical properties is obtained.

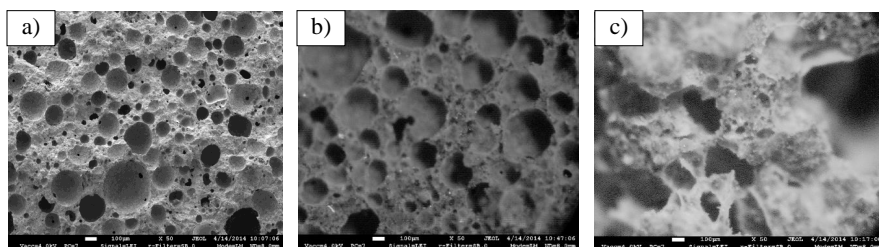


Fig. S6. Macrostructure of cement stone of PC+MKW+AEA+SPL (8 designation of cementitious matrix composition (Table S1)) after different mixing duration (magnification $\times 50$):
a) – 2 mins; b) – 5 mins; c) – 10 mins

X-ray diffraction curves for cement stone modified with additives are presented in Figure S7. It is determined that specimens when cement is modified with only AEA additive (curve a), have intensive portlandite peaks formed during hydration of cement minerals. Intensive and incompletely hydrated alite and belite peaks can be seen as well. Curve b shows that MKW additive in cement matrix significantly reduces the amount of portlandite. Calcium hydrosilicate – CSH is formed due to reaction of SiO_2 , which can be found in MKW, with portlandite formed during hydration of cement minerals.

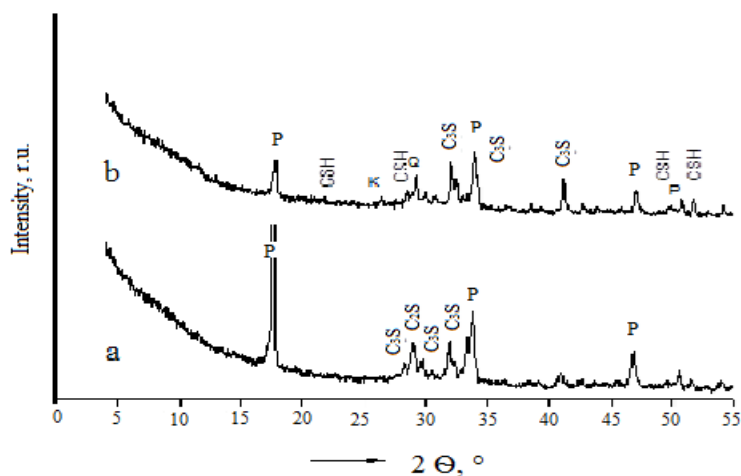


Fig. S7. The X-ray patterns of cement stone: a – PC+AEA (2); b – PC+ AEA+MKW (6).
2, 6 – designation of cementitious matrix composition (Table S1)

X-ray diffraction analysis is supplemented by the research of microstructure. Images of microstructure of cementitious matrix are obtained by scanning electron microscope with magnification of 10 000 times (Fig. S8).

Figure S8 a presents the hydration products of cements minerals – portlandite plates and alite crystals. Figure S8 b shows submicrocrystal structure with CSH nodus in

specimens with AEA additive. Figure S8 c presents calcium hydrosilicate nodus as well as hexagon plates of MKW additive. It can be observed from Figure S8 d not hydrated cement minerals, hydration product – portlandite, kaolinite from metakaoline waste and new derivatives – calcium hydrosilicates.

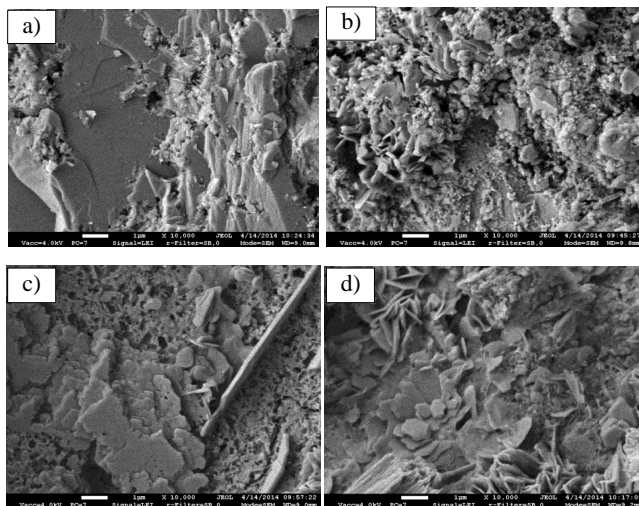


Fig. S8. Microstructure of cement stone (magnification $\times 10\,000$): a) – PC (1); b) – PC+AEA (2); c) – PC+AEA+MKW (6); d) – PC+AEA+MW+SPL (8).
1, 2, 6, 8 designation of cementitious matrix composition (Table S1)

All of this can be explained by interaction between cement paste particles and cementitious matrix modifying additives (MKW, SPL, AEA). Interaction schemes are presented in Figures S9 and S10. Figure S9 a shows cement particles in cement paste with small amount of bound and free water. It can be observed from Figure S9 b that SPL additive reduces the tension of water surface. In aqueous solution, water accumulates on the external polymer chains of polycarboxylate superplasticizer. Cement particles are coated by polycarboxylate general chain with arranged functional carbo- groups. In the next stage, cement particles with thick water layer covered with film compress with each other, the space between particles narrows, consequently, closed cavities filled with water and stationary unbound water form. During this process, metakaoline particles swell, they thicken the solution by adsorbing water on the surface (Fig. S9 c). Environment between cement and metakaoline particles in stationary water makes increase in volume, pressure of stationary water and formation of pressure which is addressed to exterior, therefore, it limits the flow of free unbound water between mixture particles. The formation of stable and dense cement paste modified with an active pozzolanic metakaoline waste additive can be observed. By adding AEA into cementitious paste mixture, pore formation process starts. AEA molecules adsorb on the surface of cement particles and assure the connection with air bubble and interaction between solid, liquid and gas phases can be evidenced. In order to overcome these interactions, forces of

pressure form in internal cavities to cover as much mixture particles (cement and MKW) as possible. During this process, connections between cement particles are mechanically broken and the amount of air bubbles in the connection of AEA molecules phases zones is increased. This process is schematically presented in Figure S10.

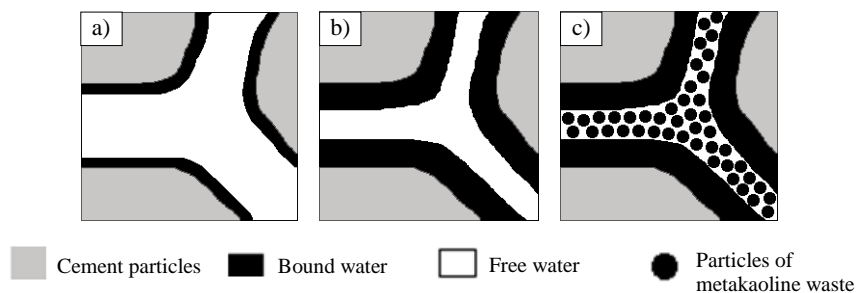


Fig. S9. Schemes of fresh cement paste modified with different additives:
a) – PC; b) – PC+SPL; c) – PC+SPL+MKW

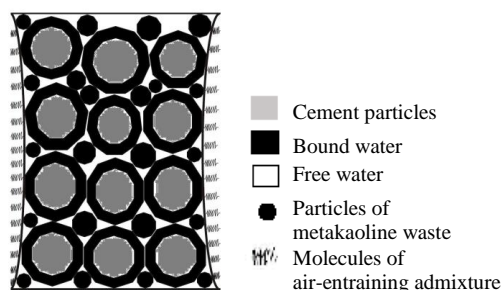


Fig. S10. Schemes between the pair partitions

One of the most important characteristics describing performance of thermal insulating material is thermal conductivity. The results of thermal conductivity for thermal insulating composite are presented in Figure S11. The density of composites is ranging from 225 to 335 kg/m³. In both cases, CGB and CGB together with crushed EPS waste as aggregates increase thermal conductivity with the increase in density. Thermal conductivity for composite with CGB and crushed EPS wastes is not significantly lower; however, the density is lower as well comparing composite with CGB only. Comparing the values of thermal conductivity, it can be observed that in the range of lower densities there is only small difference and in the range of higher densities, i.e. 300 kg/m³, results are the same. The same values at higher densities are determined by more intensive increase in thermal conductivity for composite with CGB compared to composite with CGB and crushed EPS waste.

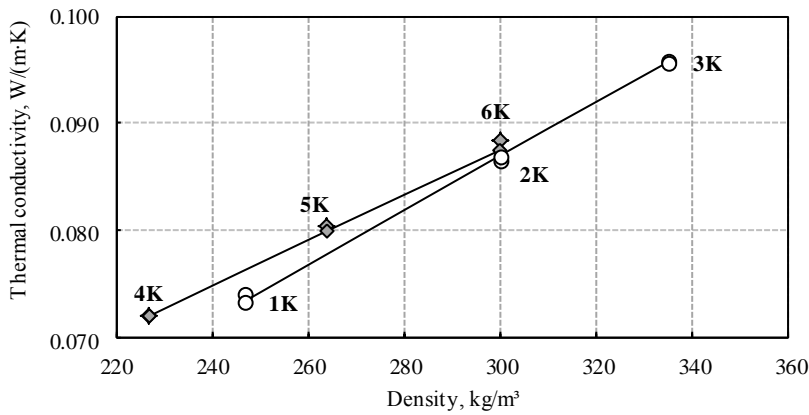


Fig. S11. Dependence of the thermal insulating composite density on the materials thermal conductivity: \blacklozenge – with CGB and crushed EPS waste; \circ – with CGB, 1K–6K – designation of composite composition (Table S2)

The impact of the amount of thermal insulating composite cementitious matrix and the type of aggregates on compressive strength is presented in Figure S12.

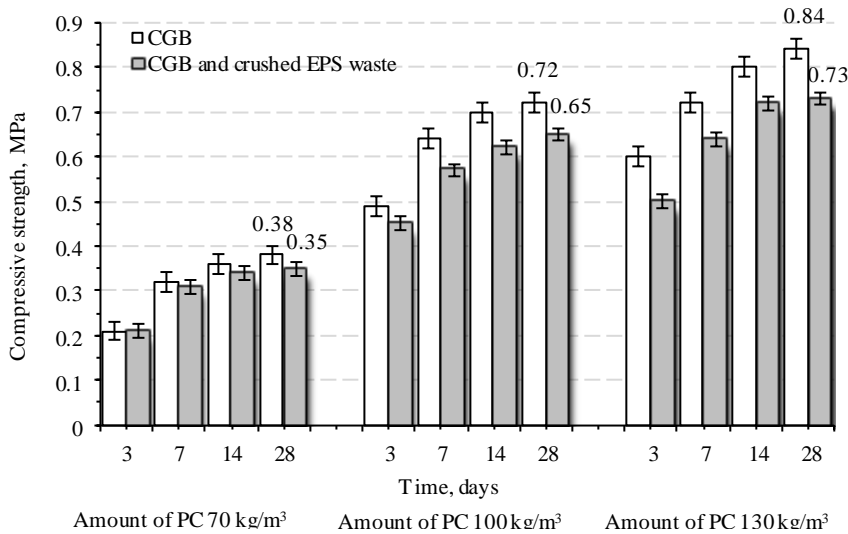


Fig. S12. Influence of the amount of binding material on compressive strength of thermal insulating composite with lightweight aggregates: 1K–6K – designation of composition (Table S2)

The main factor determining the compressive strength value for composites with lightweight aggregates and having low density (from 227 to 300 kg/m³) is dense structure assuring the contact between aggregate beads which is connected at the contact points with cementitious matrix. Analysis of the results shows that the compressive strength of prepared composite with lightweight aggregates intensively increases during the first three days and from 7 days to 28 days the intensity of increase in compressive strength is stable and not significant. Comparing the results after 28 days, the highest impact on compressive strength is due to varying amount of PC. When the amount in cement needed to produce 1 m³ of composite varies from 70 to 130 kg/m³, compressive strength after 28 days increases more than 2 times independently from the aggregates used. It means that higher amount of PC assures better contact zones between beads and allows development of stronger carcass. Meanwhile, the use of different aggregates does not have the significant impact on compressive strength. When the amount of PC is 70 kg/m³, the compressive strength difference between different aggregates is approx. 10 %, when the amount is of 100 kg/m³ – approx. 8 % and, when the amount is of 130 kg/m³ – approx. 13 %. In all cases, the compressive strength of composite with mixed aggregates is lower. It may be concluded that under insufficient densification of composite components, the breakage during compression occurs through the weakest connections, i.e. through crushed EPS wastes.

Water vapour transmission of building materials is mostly evaluated by the water vapour diffusion resistance factor μ . The impact of cementitious matrix amount and aggregate type on water vapour transmission under the dry conditions is presented in Figure S13.

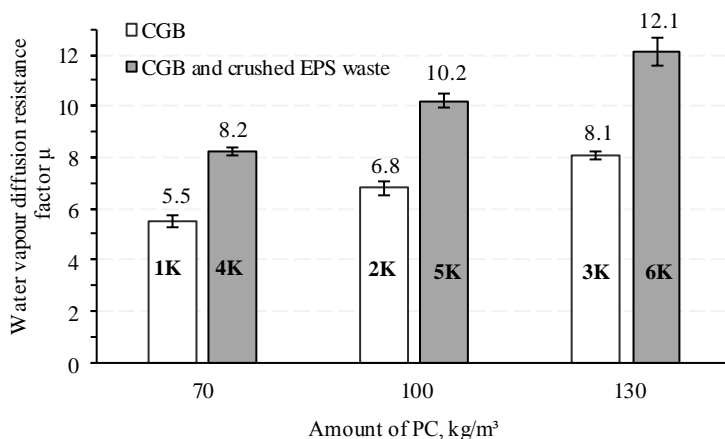


Fig. S13. Dependence of water vapour transmission of thermal insulating composite with lightweight aggregates on the amount of cement: test conditions 23-0/50.
1K–6K – designation of composite composition (Table S2)

The migration of water vapour goes through the matrix of thermal insulating composite and CGB by overcoming the resistance of solids and closed, interconnecting air gaps in its pathway. Increasing amount in PC lowers water vapour transmission and it is explained by the higher density, denser structure and finer pores between particles in which migration of vapour is slower. Vapour transmission with mixed aggregate is significantly lower. Whereas the structure of crushed EPS wastes is closed celled and such waste perfectly fills in fine spaces between large CGB, consequently, lower content in larger pores in composite structure, through which vapour transmission is better, is obtained.

Specimens of thermal insulating composite based on reaction to fire test data are classified according to LST EN 13501 requirements. Specimens for the compositions 1K, 2K or 3K are assigned to reaction to fire class A1 due to experimentally determined average organic content of materials which is 0.41%. According to European Commission decision, when organic content is lower than 1 % by mass, material may be automatically assigned to reaction to fire class A1.

The research of compositions for thermal insulating composites 4K, 5K or 6K are conducted according to LST EN 13823 and LST EN 1716 requirements. As the results show, side flame spread is not observed, fire growth rate index is equal to zero and total heat release is more than 10 times lower than permissible for reaction to fire class A2. The obtained average value of upper calorific value during the test of net heat of combustion and gross heat of combustion is 1.049 MJ/kg. According to LST EN 13501 requirements, average upper calorific value for materials based on reaction to fire class A2 should be lower than 3.0 MJ/kg. Additionally, fire resistance has been evaluated according to flaming droplets and particles and accumulation of smoke. Whereas there has been no flaming droplets and particles, the material is classified to d0 and, according to the index of smoke accumulation, to s1. Therefore, specimens for compositions 4K, 5K and 6K conforms reaction to fire class A2d0s1.

General conclusions

1. It is determined that MKW, SPL and AEA additives and mixing duration determine the properties and macro- as well as microstructure of thermal insulating composite based on cementitious matrix.

1.1. It is determined that MKW additive lengthens hydration process of cementitious matrix from 438 mins to 522 mins and maximum exothermal temperature in the mixture is reduced by 5 °C. The complex of three additives (MKW+SPL+AEA) slows the formation of cementitious matrix structure, maximum of exothermal effect is reached after 1100 mins at 60 °C temperature. It is assumed that this process is determined by water layer formed on the surface of cement particles. This layer is covered by superplasticizer film which arrests the hydration of cement minerals.

1.2. It is investigated that MKW additive by 9.5 % reduces the density of cementitious stone due to increase in specific area of MKW additive compared to PC particles. The impact of complex (MKW+SPL+AEA) under reduction in cementitious paste density is mostly dependant on mixing duration of cementitious matrix. The density of modified cementitious matrix is reduced 2 times, i.e. from 2200 kg/m³ to 1120 kg/m³ after 5 mins of mixing.

1.3. It is determined that cementitious matrix modifying pozzolanic MKW additive determines the formation of calcium silicates (C-S-H) due to active SiO_2 which intensively reacts with portlandite (Ca(OH)_2) and promotes the formation of new derivatives (C-S-H). Modification of cementitious matrix with (MKW, SPL, AEA) additives and selection of mixing time (5 mins) as the most effective factors, allow formation of stable, porous macro and microstructure of cementitious stone when the density of cementitious matrix is 1120 kg/m^3 , compressive strength – 14.5 MPa.

2. It is determined that the cement of cementitious matrix and lightweight aggregates determines physical-mechanical properties and structure of developed thermal insulating composite material.

2.1. The developed thermal insulating composite with cellular glass aggregate and modified cementitious matrix, when 70 kg/m^3 of Portland cement is used, is characterised by the density of 247 kg/m^3 , compressive strength – 0.38 MPa, thermal conductivity – $0.0741 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, water vapour diffusion resistance factor μ – 6 and fire resistance class A1. Contact zones of composite are closed, there are no voids or cracks, but there are air gaps between the granules, because in composites with CGB it is not enough fine granular or cement paste to fill them. Frost resistance studies after 25 cycles of freezing and thawing show that compressive strength decreased by 2.3 %, so the composite can be used for average by aggressive environmental conditions in building envelope constructions.

2.2. The developed thermal insulating composite with cellular glass and expanded polystyrene wastes as aggregates and modified cementitious matrix, when 70 kg/m^3 of Portland cement is used, is characterised by the density of 227 kg/m^3 , compressive strength – 0.35 MPa, thermal conductivity – $0.0721 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, water vapour diffusion resistance factor μ – 8 and fire resistance class of A2-s1,d0. When mixed aggregates are used in composites, the air voids in composite are between CGB and crushed EPS waste. Frost resistance studies after 25 cycles of freezing and thawing show that compressive strength decreased by about 9.1 %, so the composite material can be used for average by aggressive environmental conditions in building envelope construction.

Priedai¹

A priedas. Gaisringumo nustatymo pagal LST EN 13823 bandymų grafikai

B Priedas. Modifikuotos cementinės matricos patentas

C priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Jurga ŠEPUTYTĖ-JUCIKĖ

PRIEDŲ IR LENGVŲJŲ UŽPILDŲ POVEIKIS TERMOIZOLIACINIO CEMENTINIO
KOMPOZITO STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (08T)

IMPACT OF ADDITIVES AND LIGHTWEIGHT AGGREGATES ON THE
STRUCTURE AND PROPERTIES OF THERMAL INSULATING CEMENTITIOUS
COMPOSITE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2016 05 05. 12,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BJ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius